

# **CONCRETO REFORZADO CON METACAOLÍN**

**KATIA VERGARA BUSTAMANTE**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA  
CIVIL**

**ANA MARÍA MESA**

**INGENIERA CIVIL**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA**

**INGENIERÍA CIVIL**

**ENVIGADO**

**2015**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## AGRADECIMIENTOS

Realizar un trabajo de grado no es una tarea simple y muchos menos una actividad en donde el aporte es de una sola persona, por lo que mi proceso no es una excepción, las ayudas que he recibido son considerables y por ende estas empresas y personas merecen tener un pedacito en mi trabajo de grado y un agradecimiento profundo.

Primero debo mencionar a la empresa Conconcreto, en especial a la ingeniera Ana María Mesa, directora de la tesis, la ingeniera Laura Lopera, asesora y el ingeniero Juan Pablo Bolívar que me han prestado ayuda durante el proceso, igualmente cabe recalcar que la tesis que a continuación se desarrolla es un trabajo en convenio de la Escuela de Ingeniería de Antioquia y la empresa Conconcreto.

Estoy muy agradecida con todas las personas que han aportado un granito en mi formación, gracias profesores de la EIA, muchas gracias área de ingeniería civil.

Otra empresa que debo nombrar y que no tendría las palabras para decir en serio gracias es SUMICOL, al ingeniero Juan Fernando Arango L., el ingeniero Darwin Alberto Torres Montoya y en especial a Juan Diego Álvarez Ospina, laboratorista. Carolina

Por otro lado realizar concretos no es una tarea sencilla, no para una sola persona y mucho menos para una mujer, es por ende que debo agradecer por su tiempo, esfuerzo y comprensión a Jhonatan Betancur Manco, laboratorista de la EIA, Daniel Jiménez Carrillo, Stiven Bravo Gómez y Jaime Escobar Restrepo, estudiantes de la EIA, y Juan Esteban Agudelo Ardila, tecnólogo en seguridad industrial y salud ocupacional. También, pero ya en labores menos pesadas pero no menos importantes agradezco a Luis Felipe Mosquera Arias, director de laboratorios EIA, el ingeniero Mauricio Restrepo Mesa, de la EIA, a don Jorge Iván Caro Mejía, coordinador de servicios generales de la EIA, Julián Esteban Tabares Montoya, Carlos Andrés Gómez Cardona, John Alexander Arenas Lenis y Gustavo Andrés Moreno Hincapié, laboratoristas de la EIA; a Mauricio Ramírez Leal,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

egresado EIA, y Simón López Montoya, estudiantes de la EIA y a Natalia Isabel Diez, Susana Arias y María Isabel Pajón Naranjo, estudiantes y amigas de la EIA.

Por último, están esas personas que día a día te apoyan de una forma anímica (como suelen decir), esas personas que jamás se cansan de darte apoyo y decirte que todo estará bien aunque nada ande bien y esas personas que han hecho esto posible, mis padres, Martha Eugenia Bustamante Lopera y Juan Carlos Vergara Bedoya, igualmente esta mi familia entera y personas que marcan mi vida por su presencia en ella: Juan Esteban Agudelo Ardila, Daniel Jiménez Carrillo, Estefanía García Luna, Santiago Correa Echeverry, Jaime Escobar Restrepo y Stiven Bravo Gómez.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

# CONTENIDO

|   | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN.....   | 13   |
| 1. PRELIMINARES.....  | 14   |
| 1.1 Planteamiento del problema .....  | 14   |
| 1.2 Objetivos del proyecto .....  | 14   |
| 1.2.1 Objetivos Específicos .....   | 14   |
| 1.3 Marco de referencia.....  | 15   |
| 2. METODOLOGÍA.....   | 26   |
| 3. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS Y ENSAYOS DEL CONCRETO REFORZADO CON METCAOLÍN..... | 28   |
| 4. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO REFORZADO CON METACAOLÍN .....                        | 44   |
| 5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....   | 61   |
| 6. REFLEXIÓN .....  | 69   |
| 7. BIBLIOGRAFÍA.....  | 70   |
| ANEXOS .....  | 73   |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## LISTA DE TABLAS

pág.

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Condiciones de exposición y requisitos de durabilidad asociados (Ministerio de ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial, 2010). .....        | 19 |
| Tabla 2: Ejemplo de permeabilidad (coeficiente de permeabilidad) con metacaolín. Tomado de: (CORONA, 2015).....  | 23 |
| Tabla 3: Equipo necesario en la elaboración del concreto y función al momento de realizar los cilindros y vigas necesarios para las fallas .....         | 27 |
| Tabla 4: Ensayos a realizar y la norma que los rige .....  | 27 |
| Tabla 5: Diseño de mezclas de concreto de 28MPa .....  | 28 |
| Tabla 6: Parámetros de selección de cantidad de agua en un diseño de mezclas .....   | 29 |
| Tabla 7: Requisitos para condiciones especiales de exposición (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1999) .....            | 30 |
| Tabla 8: Requisitos para concretos expuestos a soluciones que contienen sulfatos (Ministerio de ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial, 2010) ..... | 30 |
| Tabla 9: Diseño de mezclas elaborado por efectos investigativos .....  | 32 |
| Tabla 10: Diseño de experimentos .....   | 34 |
| Tabla 11: Tiempo de curados para las probetas según ensayo .....   | 35 |
| Tabla 12: Resultados ensayo a compresión- mezcla patrón (28 días) (ver <b>Nota 2</b> para explicación).....  | 44 |
| Tabla 13: Resultados ensayo a compresión- mezcla patrón (56 días) (ver <b>Nota 2</b> para explicación).....  | 45 |
| Tabla 14: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 5% MK (28 días) (ver Nota 1 para explicación).....  | 46 |
| Tabla 15: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 5% MK (56 días) (ver Nota 1 para explicación).....  | 46 |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

|  |    |
|--|----|
| Tabla 16: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 10% MK (28 días) (ver Nota 1 para explicación).....   | 47 |
| Tabla 17: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 10% MK (56 días) (ver Nota 1 para explicación).....   | 47 |
| Tabla 18: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 15% MK (28 días) (ver Nota 1 para explicación).....   | 48 |
| Tabla 19: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 15% MK (56 días) (ver Nota 1 para explicación).....   | 48 |
| Tabla 20: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 20% MK (28 días) (ver Nota 1 para explicación).....   | 49 |
| Tabla 21: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 20% MK (56 días) (ver Nota 1 para explicación).....   | 49 |
| Tabla 22: Resultados completos ensayos de compresión a 28 y 56 días .....  | 50 |
| Tabla 23: Resultados módulo de rotura .....  | 51 |
| Tabla 24: Relación resistencia a la flexión (56 días) y resistencia a la compresión.....   | 51 |
| Tabla 25: Relación resistencia a la flexión (90 días) y resistencia a la compresión.....   | 51 |
| Tabla 26: Determinación de la permeabilidad por flujo constante .....  | 58 |
| Tabla 27: Medida de columna de agua en ensayo de permeabilidad.....  | 59 |
| Tabla 28: Costos del concreto elaborado con las diferentes adiciones de metacaolín .....   | 67 |
| Tabla 29: Relación de permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración. Tomado de: (instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1998) ..... | 68 |
| Tabla 30: Mezclas patrón para cilindros, vigas y tortas para abrasión .....  | 73 |
| Tabla 31: Mezclas 5MK para cilindros, vigas y tortas de abrasión .....   | 73 |
| Tabla 32: Mezclas 10MK para cilindros, vigas y tortas para abrasión .....  | 74 |
| Tabla 33: Mezclas 15MK para cilindros, vigas y tortas para abrasión .....  | 74 |
| Tabla 34: Mezclas 20MK para cilindros, vigas y tortas para abrasión .....  | 74 |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

|   |    |
|---|----|
| Tabla 35: Resultados con mezcla Patrón.....   | 76 |
| Tabla 36: Resultados con reemplazo del 5% de metacaolín.....                                    | 77 |
| Tabla 37: Resultados con reemplazo del 10% de metacaolín.....                                   | 78 |
| Tabla 38: Resultados con reemplazo de 15% de metacaolín.....                                    | 79 |
| Tabla 39: Resultados con reemplazo de 20% de metacaolín.....                                    | 80 |
| Tabla 40: Resultados mezcla patrón - Modulo de rotura.....                                      | 81 |
| Tabla 41: Resultados mezcla con adición de 5 MK - Modulo de rotura.....                         | 82 |
| Tabla 42: Resultados mezcla con adición de 10MK – Modulo de rotura.....                         | 82 |
| Tabla 43: Resultados mezcla con adición de 15MK - Modulo de rotura.....                         | 83 |
| Tabla 44: Resultados mezcla con adición de 20MK - Modulo de rotura.....                         | 84 |
| Tabla 45: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla patrón.....                           | 86 |
| Tabla 46: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla con adición de 5% de metacaolín.....  | 87 |
| Tabla 47: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla con adición de 10% de metacaolín..... | 88 |
| Tabla 48: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla con adición de 15% de metacaolín..... | 89 |
| Tabla 49: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla con adición de 20% de metacaolín..... | 90 |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## LISTA DE GRÁFICAS

|   | pág. |
|---|------|
| Gráfica 1: Resultado esperado en el ensayo de abrasión o resistencia al desgaste (CORONA, 2015).....  | 25   |
| Gráfica 2: Proceso extracción y elaboración del metacaolín .....  | 33   |
| Gráfica 3: Procedimiento ensayo de compresión- Norma NTC 673 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 2012) .....                  | 36   |
| Gráfica 4: Procedimiento para ensayo de módulo de rotura según norma NTC 2871 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1999) ..... | 38   |
| Gráfica 5: Proceso (parte I) en el ensayo de RAS regido por la norma ASTM C1260 y C1567 (ASTM International, 2014) .....                                      | 39   |
| Gráfica 6: Proceso (parte II) en el ensayo de RAS regido por la norma ASTM C1260 y C1567 (ASTM International, 2014).....                                      | 39   |
| Gráfica 7: Procedimiento para ensayo de permeabilidad según norma NTC 4483 (Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1998) .....    | 41   |
| Gráfica 8: Procedimiento de ensayo para la resistencia a la abrasión regido por la norma ASTM C1183-M (ASTM international, 2012).....                         | 43   |
| Gráfica 9: Resultado RAS para mezcla patrón.....  | 53   |
| Gráfica 10: Resultado RAS con reemplazo del 5% de metacaolín .....  | 54   |
| Gráfica 11: Resultado RAS con adición del 10% de metacaolín .....   | 55   |
| Gráfica 12: Resultado RAS con reemplazo del 15% de metacaolín .....   | 56   |
| Gráfica 13: Resultado RAS con reemplazo del 20% de metacaolín .....   | 57   |
| Gráfica 14: Resumen de resultados de ensayos a compresión con los diferentes porcentajes de adición de metacaolín.....  | 63   |
| Gráfica 15: Resumen de resultados de resistencia a la flexión a los 56 días de curado...  | 63   |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



|  |    |
|--|----|
| Gráfica 16: Resumen de resultados de resistencia a la flexión vs. Resistencia a la compresión..... | 65 |
| Gráfica 17: Resumen ensayo reacción álcali agregado .....  | 67 |
| Gráfica 18: Resultados independientes de mezcla patrón .....                                       | 77 |
| Gráfica 19: Resultados independientes con reemplazo de 5% de metacaolín .....                      | 77 |
| Gráfica 20: Resultados independientes con reemplazo de 10% de metacaolín .....                     | 78 |
| Gráfica 21: Resultados independientes con reemplazo de 15% de metacaolín .....                     | 79 |
| Gráfica 22: Resultados independientes con reemplazo de 20% de metacaolín .....                     | 80 |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## LISTA DE IMAGENES

pág.

|  |    |
|--|----|
| Imagen 1: Ejemplo de ensayo de permeabilidad con diferentes porcentajes de metacaolín. Tomado de: (CORONA, 2015).....  | 23 |
| Imagen 2: Maquina de ensayo para módulo de rotura definida por la norma NTC 2871 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1999) .....       | 37 |
| Imagen 3: Dispositivo de ensayo para calcular permeabilidad de los especímenes de concreto (Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1998) . | 41 |
| Imagen 4: Aparato para ensayo de abrasión según ASTM C1138M (ASTM international, 2012) .....   | 42 |
| Imagen 5: Montaje de ensayo de permeabilidad del proyecto en estudio. Imagen propia  | 59 |
| Imagen 6: Medida columna de agua para mezcla patrón.....   | 85 |
| Imagen 7: Medida columna de agua para mezcla con 5% de metacaolín .....  | 86 |
| Imagen 8: Medida columna de agua para mezcla con 10% de metacaolín .....   | 87 |
| Imagen 9: Medida columna de agua para mezcla con 15% de metacaolín .....   | 88 |
| Imagen 10: Medida columna de agua para mezcla con 20% de metacaolín .....  | 89 |
| Imagen 11: Falla cilindro 1 .....  | 95 |
| Imagen 12: Falla cilindro 2.....   | 95 |
| Imagen 13: Falla cilindro 3.....   | 96 |
| Imagen 14: Falla cilindro 4.....   | 96 |
| Imagen 15: Falla cilindro 5.....   | 96 |
| Imagen 16: Falla cilindro 6.....   | 96 |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## LISTA DE ANEXOS

|  | pág.      |
|--|-----------|
| <b>Anexo 1: Cantidades de material utilizadas por mezcla .....</b>                 | <b>73</b> |
| <b>Anexo 2: Ficha técnica FORTACRET 10 de Corona .....</b>                         | <b>75</b> |
| <b>Anexo 3: Resultados completos ensayo de reacción álcali agregado (RAS).....</b> | <b>76</b> |
| <b>Anexo 4: Resultados ensayo Modulo de Rotura a los 56 días y 90 días .....</b>   | <b>81</b> |
| <b>Anexo 5: Imágenes de ensayo de permeabilidad .....</b>                          | <b>85</b> |
| <b>Anexo 6: Aditivo Plastol HR-DF .....</b>  | <b>91</b> |
| <b>Anexo 7: Aditivo Plastol HR-DM .....</b>  | <b>93</b> |
| <b>Anexo 8: Imágenes de fallas a compresión .....</b>                              | <b>95</b> |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## RESUMEN

El concreto reforzado con metacaolín (también conocido como Fortacret) es un material que se encuentra en estudio desde algún tiempo atrás, en esta ocasión se busca ver el efecto del uso de este cementante frente al comportamiento de una mezcla tradicional de concreto de la empresa Industrial Conconcreto utilizando los materiales (arena y triturado) de dicha empresa. Se busca evaluar el comportamiento del concreto con diferentes adiciones de metacaolín (5%, 10%, 15% y 20%) y encontrar la mezcla más eficiente en propiedades e indirectamente en costo.

La experimentación se realizó por medio de ensayo y error, adicionando los diferentes porcentajes de metacaolín para obtener las mezclas con las que se fabricaron los especímenes de ensayo. Las pruebas realizadas para determinar la incidencia del metacaolín dentro de las propiedades mecánicas y físicas del concreto, fueron resistencia a la compresión (NTC 673), resistencia a la flexión (NTC 2871), reacción álcali agregado (ASTM C1260 y C1567), permeabilidad del concreto al agua (NTC 4483) y resistencia a la abrasión (ASTM C1183M).

Los resultados obtenidos, no evidenciaron, que con la adición de metacaolín puedan obtenerse aumentos considerables en cuanto a la resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, pero se observaron mejoras en la reacción álcali agregado para las mezclas evaluadas y en la permeabilidad al agua. El ensayo de resistencia a la abrasión se encuentra en proceso a la fecha de presentación de este informe.

Palabras claves: concreto, metacaolín, propiedades del concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## **ABSTRACT**

Reinforced concrete with metakaolin (also known as Fortacret) is a material that's been studied a long time ago. This time we are looking to see the effect of this cement compared to Concreto's traditional mix behavior using materials (sand and crushed) of Industrial Concreto. We observe concrete's behavior with different additions of metakaolin (5%, 10%, 15%, 20%) and we look for the most efficient one.

Tests for establishing properties of metakaolin into the concrete are: compressive strength, flexural strength, alkali aggregate reaction, permeability and abrasion resistance.

Experimentation is made through trial and error until mixture is obtained. It's held in field with the different metakaolin additions for the realization of the specimens to be tested, it's cured and eventually lead to the failure (each of these processes is made under Colombian technical laws (NTC) and ASTM).

Results obtained are not the ones expected according to previous researchs of material behavior, but through this study we are able to find the flaws that led to this, which is why reveals the best results for future studies. The compressive strength and flexural strength improves, alkali aggregate reaction gives the expected results and permeability, abrasion may improve, but more than this, we give results about how to make concrete, how mixtures should be improved for the use of metakaolin and how to understand each of the tests performed

Key words: Concrete, metakaolín, properties of the concrete.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta un estudio del impacto de la adición de metacaolín en una mezcla de concreto tradicional, utilizando agregados de Industrial Concreto. Se tiene como objetivo entender el comportamiento de este cementante a diferentes porcentajes de sustitución de cemento (5%, 10%, 15% y 20%).

Se busca que este material mejore las propiedades del concreto en cuanto a su resistencia a la compresión y a la flexión, que son requisitos para la construcción de todo tipo de estructuras; la reacción álcali agregado, para mejorar el comportamiento del concreto en ambientes químicamente fuertes como aguas marítimas; la permeabilidad, para mejorar la protección que el concreto le puede brindar al acero de refuerzo y aumentar su durabilidad; y, la resistencia a la abrasión, tratando de generar menos desgaste en la estructura y darle mayor vida útil.

Para verificar lo anterior se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, reacción álcali agregado, permeabilidad y resistencia a la abrasión a la mezcla patrón, y cada una de las mezclas con las sustituciones de cemento por metacaolín.

En el trabajo se encuentran el planteamiento del problema, los objetivos y un marco de referencia, la metodología que se llevó a cabo, el procedimiento para la elaboración de mezclas y ensayos del concreto reforzado con metacaolín, que servirá para entender cómo se obtuvieron los resultados. Más adelante se encuentran los resultados obtenidos de los ensayos, conclusiones y consideraciones finales. Finalmente está la bibliografía que sirve de apoyo en la investigación, y una serie de anexos que se referencian durante el trabajo y que permiten comprender a fondo las conclusiones obtenidas.

.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

# **1. PRELIMINARES**

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Se busca implementar un concreto con resistencias óptimas y estipuladas por las normas que rigen en Colombia, y que aumente la protección del material de refuerzo, de forma que su contacto con el agua y otros minerales no produzca oxidación del material, pues de lo contrario se daría una reducción de las propiedades mecánicas del acero y con ello su función principal de resistencia a la tracción en una estructura, sería poca o con un comportamiento indebido.

Se pretende innovar, por medio de un estudio que implica la adición de metacaolín al concreto usado en la Constructora Conconcreto, y un seguimiento de los cambios en las propiedades que esto produce. Los beneficios que se esperan son económicos y ambientales.

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

Desarrollar diseños de mezcla de concreto para la Constructora Conconcreto resistentes a los ataques de sulfatos, álcalis y otras sustancias agresivas; manteniendo su resistencia mecánica, a partir de la adición de metacaolín y estudiando una serie de propiedades adicionales que un concreto debe tener.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

Obtener un diseño de mezcla patrón que cumpla con la resistencia a la compresión objetivo que permita realizar las sustituciones de material cementante por metacaolín.

Elaborar las mezclas de concreto con las diferentes sustituciones de metacaolín para fabricar las probetas de ensayo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Realizar las pruebas de laboratorio para determinar la resistencia de la mezcla en cada uno de los aspectos a estudiarse.

Calcular por medio de datos extraídos de pruebas de laboratorio, como las mezclas de concreto con metacaolín inciden en la permeabilidad de este y aumentan la protección del acero del concreto reforzado al estar expuesto a un ambiente altamente agresivo.

Sustentar con base en los resultados obtenidos con experimentación, como el concreto adicionado con metacaolín mejora su desempeño frente a la reacción a los álcalis en los agregados.

Calcular la afectación de la resistencia de un concreto de diseño tradicional con la adición de diferentes porcentajes de metacaolín; buscando mantener la resistencia de diseño o en un mejor caso aumentarla.

### **1.3 MARCO DE REFERENCIA**

El trabajo que se presenta se desenvuelve en el contexto de LA CONSTRUCCIÓN, aspecto encargado de los ingenieros civiles.

Según los objetivos propuestos se busca mayor resistencia del concreto en ambientes salinos, a álcalis de los agregados y un mejoramiento del módulo de resistencia que son factores de gran importancia en lugares donde el concreto tiene contacto con el agua, en especial los ubicados en ambientes marítimos, por lo cual el uso más fuerte que tendría sería en estructuras en donde el contacto con estos componentes sea, casi que, constante.

Para comprender la terminología crucial en el proyecto se deben tener claro ciertos conceptos claves en la temática. Estas palabras y sus significados se muestran a continuación, con un enfoque en el tema.

Concreto: también llamado hormigón, es la unión de cemento, agua, aditivos, grava y arena lo que nos da una mezcla llamada concreto. El cemento representa sólo el 15% en

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



la mezcla del concreto por lo que es el que ocupa menor cantidad en volumen; sin embargo su presencia en la mezcla es esencial (Holcim México, s.f.).

Caolín: El caolín es un mineral no renovable, es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas, principalmente (Olvera Venegas & Hernández Cruz, 2013).

Metacaolín: este se produce al calcinar el caolín a temperaturas aproximadas de 550°C, produciendo una transformación de su estructura cristalina (Santalla , 2012).

Feldespato: es el grupo más abundante de minerales en la corteza terrestre, formando alrededor del 60% de las rocas terrestres, en ígneas, metamórficas y sedimentarias. El término feldespato abarca toda una gama de materiales. La mayoría de los productos que se usan a diario se hacen con feldespato: vidrio en los vasos, vidrio de protección, de fibra de vidrio para el aislamiento, las baldosas del suelo, platos de ducha en los baños y la vajilla que se usa a diario para servir los alimentos.

Silicatos: grupo de minerales, componentes fundamentales de la corteza terrestre, que entran a formar parte de la composición de casi todas las rocas (Baroni & Eros, 2005).

Álcalis: es un compuesto químico que posee propiedades alcalinas, es decir, tiene la capacidad para neutralizar ácidos (Baroni & Eros, 2005).

Puzolana: es un material natural o artificial que contiene sílice y/o alúmina. Cuando estos son finamente molidos y se mezclan con cal, la mezcla se fragua y endurece a temperaturas normales en presencia de agua, al igual que un cemento (Stulz & Mukerji, 1993)

Actualmente existen varios estudios realizados acerca de las propiedades que adquiere el concreto reforzado con metacaolín, a continuación se exponen algunas de estas investigaciones en forma generalizada:

En Colombia los profesores Nancy Torres Castellano, Silvia Izquierdo García, Janneth Torres Agredo y Ruby Mejía de Gutiérrez, de la *Universidad del Valle* y la *Universidad*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

*Nacional* realizaron una investigación conjunta titulada: “Resistencia a la penetración del ion cloruro y a la carbonatación de concretos adicionados, con un residuo de la industria petroquímica” en donde se realizaron pruebas con concreto tradicional (composición sin adición) contra mezclas a las cuales se les adicionaba residuos de catalizador de craqueo catalítico, humo de sílice y metacaolín (por separado). Los resultados para el metacaolín fueron óptimos, es decir, este componente ayuda al concreto a obtener mayor resistencia a la compresión a los 180 días de curado y, a su vez, la permeabilidad disminuye (Torres Castellano, Izquierdo García , Torres Agredo, & Mejía Gutiérrez , 2014).

Nuevamente en Colombia, específicamente en la *Universidad del Valle*, se realizó un estudio para la prevención de la corrosión del acero y otros deterioros de este por la temperatura del ambiente a la que está expuesto; se llegó a la conclusión que la adición de minerales con sílice y alúmina ayudan a la reducción de la permeabilidad y por ende, la durabilidad del concreto curado es mayor. Especialmente, el metacaolín demostró grandes ventajas en la durabilidad, flexión, compresión y genera incrementos en la resistencia a ataques químicos (Aguirre & Mejía de Gutierrez, 2013).

En las universidades de *Dudde* y *Putras Malasia* en el Reino Unido y Malasia, respectivamente, se realizaron estudios para ver el efecto del metacaolín en la resistencia inicial del concreto hecho en combinaciones ternarias de cemento portland con escorias granuladas y metacaolín. Las combinaciones llevadas a cabo fueron variadas pero finalmente se obtuvo como resultado que inicialmente el concreto con metacaolín no obtiene la resistencia deseada en los primeros días, pero que al finalizar su curado, a los 28 días, la resistencia alcanzada es mejor de la esperada (McCarthy & Nasir, 2014).

En *Fourth Harbor Engineering Institute Co* y en la *Wuhan University of Technology*, ambos en China, se encuentran investigaciones sobre la “influencia del metacaolín en la fuerza y la microestructura de concreto de alta resistencia al curado con vapor”; se halló que el metacaolín incorporado en diferentes porcentajes del peso de cemento a utilizarse hacia variar la obtención de la resistencia a medida que pasaba el tiempo, y finalmente a medida que se aumentaba el porcentaje de metacaolín la resistencia final del concreto era mayor a la del diseño (Zeng, Fan, & Chen, 2014).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Es posible concluir que el tema de forma general tiene una bibliografía amplia como motivo de investigación pero por motivo del estudio que se lleva a cabo se presenta información más específica de lo que se debería obtener u observar durante la investigación.

### Resistencia a la compresión

Se busca obtener la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto igual o superior a 28 ( $\pm 4$ ) MPa, a los 28 días, de acuerdo con el diseño de mezcla usado. Y a los 56 y 90 días de curado, la falla debe aumentar de forma casi insignificante, pero no debe disminuir (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 2012).

Los valores obtenidos dependen del tamaño y forma del espécimen, la dosificación, el procedimiento de mezclado, los métodos de muestreo, moldeo, la fabricación, la edad, la temperatura y las condiciones de humedad durante el curado (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 2012).

Con el uso de Metacaolín generalmente se aprecia un aumento de la resistencia a la compresión del concreto. Esto podría llevar a pensar, por una parte, que se puede realizar un ajuste en el diseño de la mezcla para bajar la cantidad de cemento o cementantes o, por otra parte, modificar la relación A/C. Sin embargo, algunas regulaciones y diseñadores pueden exigir que las mezclas de concreto no superen un valor límite de relación agua a cementante (A/C), que suele ser bajo, con el fin de controlar condiciones de durabilidad y que en términos prácticos conducen a altos contenidos de material cementante. La NSR-10 y el ACI 350 recomiendan relaciones A/C que se encuentren entre 0,45 o de 0,40, según el tipo de exposición ambiental a la cual estará expuesto el concreto, en conjunto con una resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) la cual se considera en todos los casos como un valor mínimo y de referencia, estos valores se presentan en la Tabla 1. Así, cuando se busca mayor durabilidad, una baja relación A/C conlleva al uso de aditivos reductores de agua para lograr la trabajabilidad de colocación, y que los contenidos de cemento en una mezcla sean superiores a los requeridos para lograr la resistencia a la compresión especificada (CORONA, 2015).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 1: Condiciones de exposición y requisitos de durabilidad asociados (Ministerio de ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial, 2010).

| <b>Condición de exposición</b>   | <b>Relación<br/>A/C máx.,<br/>en peso</b> | <b><math>f'c</math><br/>mínima<br/>(MPa)<sup>(*)</sup></b> | <b>Tipo de estructura</b>  |
|--|---|--|--|
| Concreto que requiere baja permeabilidad cuando está expuesto a agua, aguas residuales y gases corrosivos  | 0,45                                      | 28   | <p>Tanques de agua potable</p> <p>Plantas de tratamiento</p> <p>Estructuras hidráulicas y canales</p> <p>Tuberías, coberturas</p> <p>Fundaciones profundas</p> <p>Estribos de puentes</p> <p>Concreto arquitectónico</p> <p>Pozos petroleros</p> |
| Concreto expuesto a químicos corrosivos, diferentes a sales de deshielo  | 0,42                                      | 31,5   | <p>Plantas industriales</p> <p>Plantas de procesamiento de lácteos</p>   |
| Protección a la corrosión del refuerzo en: concreto expuesto a cloruros en tanques que contienen agua salobre ; y concretos expuestos a agua marina o salpiques de agua marina | 0,40                                      | 35   | <p>Piscinas</p> <p>Puertos, muelles y embarcaderos</p> <p>Obras de protección marina</p> <p>Fundaciones profundas</p> <p>Concreto arquitectónico o a la vista en zonas costeras</p> <p>Pozos petroleros</p>                                      |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Se espera que el material adicionado reaccione con algunos de los componentes del cemento y se produzca más gel de CSH (ya que posee este compuesto en forma normal) el cual da mayor resistencia a la portlandita (compuesto del cemento) (CORONA, 2015).

Pero por resultados arrojados de investigaciones, se establece que al realizar reemplazos de metacaolín por cemento con porcentajes del 10%, se logran los máximos valores de resistencias a la compresión. Valores superiores al 10% no han mostrado aumentos significativos. Las máximas resistencias relativas se dieron a los 14 días, lo que les permitió establecer que la actividad puzolánica del metacaolín alcanza su punto máximo de reacción en este período de tiempo, adicionalmente la resistencia a la compresión en mezclas con reemplazos por encima del 20% han demostrado una disminución drástica (Restrepo Gutiérrez, Restrepo Baena, & Tobón, 2006).

#### Módulo de rotura

Tiene como fin determinar el esfuerzo a la flexión del concreto usando vigas simples. Los datos presentan una variación según el tamaño del espécimen, su preparación, el contenido de humedad, el curado o si la viga se fundió o se cortó al tamaño requerido (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1999).

El módulo de rotura es cerca del 10 % al 20 % de la resistencia a compresión, este valor varía según las dimensiones y volumen del agregado grueso que se utiliza (National Ready Mixed Concrete Association, 1998).

#### Reacción álcali agregado

Este método de ensayo proporciona un medio para detectar el potencial de deterioro de un agregado destinado a ser utilizado en el hormigón, siendo sometido a una reacción álcali-sílice, buscando como resultado ver el potencial de expansión interna de la barra de concreto (ASTM international, 2014), es decir, permite conocer la reactividad de un agregado cuando se encuentra expuesto al agua con contenidos de silicatos y saber el potencial de peligro que este aspecto puede causar en una estructura. Es un método que va ligado netamente a los agregados de la mezcla, y en especial a la arena.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Cuando se da la reacción álcali agregado en un concreto se evidencia tiempo después, ya que es una reacción lenta. Durante el proceso se evidencian fisuras y disgregación, especialmente en las estructuras que están en contacto con el agua (pura o con presencia de álcalis como el mar) (CORONA, 2015). Sucede que el cemento, que es rico en álcalis, reacciona con los agregados, los cuales contienen sílice reactiva formando un compuesto que se expande (CORONA, 2015).

La reacción álcali-agregado produce una serie de compuestos expansivos que afectan a los concretos expuestos a condiciones de inmersión o ciclos de secado y mojado, la respuesta al expandirse el material es agrietamiento, cambio de magnitudes, disminución de la resistencia y de servicio de la estructura (CORONA, 2015).

#### Permeabilidad del concreto al agua

A través de este método se obtiene el coeficiente de permeabilidad del concreto endurecido por dos métodos: flujo constante y profundidad de penetración. El método de flujo constante sirve para la determinación del coeficiente de permeabilidad de concretos de alta permeabilidad y el segundo, es decir, el método de profundidad de penetración se utiliza cuando los concretos son de muy baja permeabilidad (Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1998).

En el proceso se hacen ambos métodos para encontrar el comportamiento frente a la permeabilidad al agua y la absorción capilar del concreto (que requiere conocer el grado de absorción y porosidad).

En la práctica es de mayor interés conocer el grado de absorción y la porosidad de un concreto, que la permeabilidad; más cuando se necesita una estructura que estará sometida al ataque de sustancias agresivas que se encuentran disueltas en el agua. El ensayo de permeabilidad se realiza cuando se requiere un concreto que este expuesto a una presión hidrostática importante (Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1998).

El paso de agua a través del concreto trae consigo varias consecuencias, entre esas: disminuye la durabilidad de la estructura debido a la posibilidad de transportar sales que

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

serán responsables de procesos expansivos, corrosivos, o de ataque ácido en los agregados, la pasta de cemento o el acero de refuerzo. Estas sales pueden estar presentes de forma natural en el agua o el suelo, la atmósfera, o también por procesos derivados de la acción humana (por ejemplo aguas industriales, servidas o negras, emisiones a la atmósfera por vehículos o industrias). Así mismo, una alta permeabilidad en el concreto produce pérdida del líquido o los gases que se encuentren almacenados en una estructura de concreto (CORONA, 2015), por lo cual lo que se esperaría en el diseño patrón de la mezcla es algo muy parecido a lo anteriormente dicho.

Igualmente en los concretos arquitectónicos, una alta permeabilidad al agua es asociada con el aumento de eflorescencias en la superficie del concreto y a la aparición de hongos, algas, levaduras, bacterias (Miledw), vegetación, insectos, etc. Estos, a su vez, son otro factor de daño de la capacidad del concreto (CORONA, 2015).

Al adicionar los diferentes porcentajes de metacaolín a la mezcla se busca generar un material mucho más denso (mayor durabilidad) y menos poroso lo cual lleva a la disminución de la permeabilidad al agua (CORONA, 2015), es decir, que se produzca un gel extra de silicato de calcio hidratado y una reducción del hidróxido de calcio, otorgando ventajas como son el aumento de resistencias mecánicas y disminución de porosidad, lo cual hará un concreto menos permeable (Restrepo Gutiérrez, Restrepo Baena, & Tobón, 2006)

De forma más sencilla se puede afirmar que a menos permeabilidad que se obtenga, se logra una disminución en la corrosión de acero del refuerzo del concreto, trayendo a su vez menos mantenimiento, es decir, menos costos a largo plazo de una estructura (Rafit Abbas, 2010).

En síntesis se tienen estudios ya hechos en donde, predecir la permeabilidad de un concreto normal es difícil, pero se nota y se demuestra que al agregar el metacaolín en diferentes porcentajes se puede apreciar una disminución de la permeabilidad. En la Tabla 2 y la Imagen 1 se observa el resultado de un estudio realizado por Corona y que serían los resultados que se esperan en la tesis en proceso.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 2: Ejemplo de permeabilidad (coeficiente de permeabilidad) con metacaolín. Tomado de:  
(CORONA, 2015)

| % de reemplazo de cemento con FORTACRET de Corona® | Coeficiente de permeabilidad K (m/s) |
|--|--------------------------------------|
| 0%   | $7,7162 \times 10^{-11}$             |
| 5%   | $5,5145 \times 10^{-12}$             |
| 10%  | $1,7616 \times 10^{-12}$             |

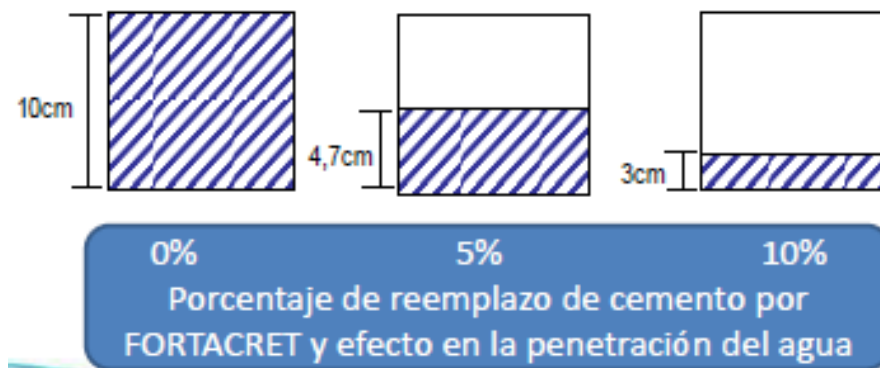


Imagen 1: Ejemplo de ensayo de permeabilidad con diferentes porcentajes de metacaolín. Tomado de: (CORONA, 2015)

*Nota 1: Proceso del ensayo de permeabilidad*

*Para la fecha de entrega del trabajo se encuentra en proceso la realización de los ensayos de permeabilidad, en la Imagen 5 se puede apreciar el montaje realizado en la empresa Corona sede corlan, Rionegro.*

### Resistencia a la abrasión

Por medio del ensayo de abrasión se trata de simular el contacto de una estructura de concreto con el agua y las partículas abrasivas que por esta fluyen. Estas partículas producen un desgaste en el hormigón, y se espera conocer la resistencia del material ante

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



estos efectos de remolinos de agua con suspensión de material (ASTM international, 2012).

Conocer esta propiedad permite seleccionar los materiales que serán usados en diferentes estructuras, no es lo mismo realizar una pila en bajo el mar que está expuesta al agua salada permanentemente, que una pila bajo tierra o simplemente al aire libre.

Para las mezclas de concreto patrón que serán usadas en estructura no es usual hacer este ensayo ya que no ocasiona problemas estructurales (valga la redundancia), sin embargo puede causar un comportamiento bajo en condiciones de servicio o de forma indirecta puede proporcionar una probabilidad mayor para ataques químicos afectando la durabilidad del mismo (Academia).

La mezcla patrón presentará un desgaste que exactamente no es posible decirlo aún pero:

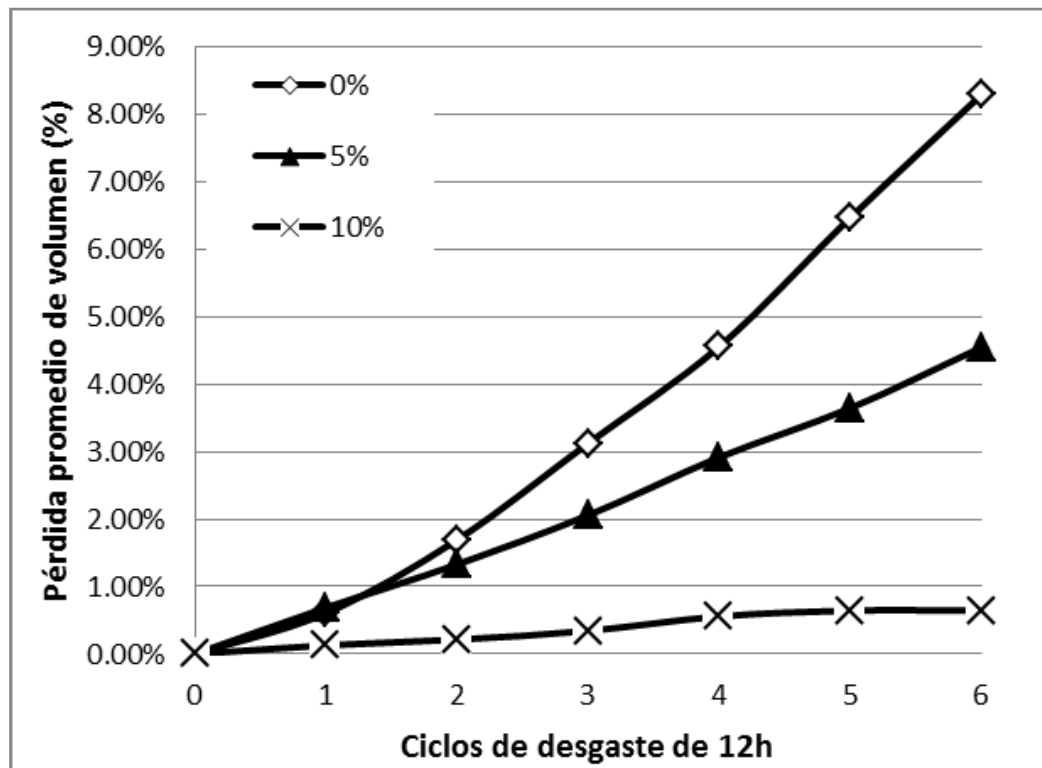
Cuando se usan relaciones agua-cemento en la superficie (que se logra con aditivos reductores de agua en la mezcla) como es el caso, se controla de una mejor manera la abrasión causada (Academia).

Una correcta gradación del agregado fino y grueso para realizar el diseño de mezclas lleva como resultado un razonamiento óptimo de materiales y así un control de abrasión mejor (Academia).

Ambos parámetros se presentan en las mezcla patrón por lo cual se espera buenos resultados.

Cuando se adicione el metacaolín se espera un aumento en la resistencia a la abrasión del concreto de hasta 9 veces la resistencia obtenida en la mezcla patrón (CORONA, 2015), en la Gráfica 1 se evidencian resultados realizados por la empresa Corona.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Gráfica 1: Resultado esperado en el ensayo de abrasión o resistencia al desgaste (CORONA, 2015)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## **2. METODOLOGÍA**

El estudio que se llevó a cabo extrae respuestas por medio de la experimentación, es decir, aunque es un tema que se ha estudiado con anterioridad, este llega a respuesta a través de ensayos y sustentaciones físicas de lo que sucede; un procedimiento experimental por medio de ensayo y error, con materiales y procesos regidos según los estándares de normatividad que rige en Colombia.

La principal labor es llevar diferentes porcentajes de metacaolín agregados en la mezcla del concreto tradicional, que después de ser curadas, se enfrentan a diversos ensayos para definir su desgaste, su resistencia, la forma como las sales han penetrado el material, entre otros.

Etapas del proceso:

Como etapa inicial y principal del proyecto se obtiene el diseño de mezcla del concreto que se utilizará, este es un concreto tradicional usado en Concreto con una resistencia de diseño de 28 MPa.

Elaboración y curado de especímenes de concreto: para la elaboración del concreto se tuvieron en cuenta aspectos principales como la humedad de la arena y agregado, el tiempo de mezcla y su asentamiento (que de forma indirecta marca la fluidez del material), en este proceso el equipo y su función se evidencian en la Tabla 3. En cuanto al curado se utiliza un tanque, el agua es limpia (proporcionada por el acueducto de la Escuela de Ingeniería de Antioquia) y por motivos de clima la temperatura de curado fue de aproximadamente 15 grados Celsius el tiempo completo y en todos los especímenes.

Ensayos: Son 5 ensayos principales los que marcan el estudio, cada uno regido por norma (ver Tabla 4) y para cada una de las mezclas que se realizarán, es decir, en las sustituciones de 5%, 10%, 15% y 20% de metacaolín, adicionalmente se realiza el ensayo de asentamiento del concreto que corresponde a la norma NTC 396.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Análisis de datos y conclusiones: es al paso más importante y de mayor profundización, es decir, cada uno de los ensayos elaborados (ver Tabla 4) entrega una serie de datos que se organizan y se llevan a profundizar en cuanto a ¿qué dieron? y en ¿qué afecta el proceso (sea de forma positiva o negativa) los datos obtenidos?, es con esto que se llega a las conclusiones del proceso de investigación.

Tabla 3: Equipo necesario en la elaboración del concreto y función al momento de realizar los cilindros y vigas necesarios para las fallas

| Tara y horno   | Concretadora   | Cono de Abraham y varilla  | Coche, palustre y pala  | Formaletas o moldes  | Chipote y varilla compactadora   |
|--|--|--|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Necesario para el secado de la muestra de arena y agregado</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Se conto con una de 1.5 sacos de cemento para realizar el concreto</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Importante para medir el asentamiento de la mezcla elaborada</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Transporte y manejo del concreto para elaboración de moldes de concreto</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cilíndricas o en forma de viga, metálicas , en PVC y madera para elaboración de especímenes.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Por norma necesarios para la compactación del concreto en los moldes</li> </ul> |

Tabla 4: Ensayos a realizar y la norma que los rige

| NTC 673  | NTC 2871   | ASTM C1260<br>ASTM C1567   | NTC 4483   | ASTM C1138M   |
|--|--|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Ensayo de resistencia a compresión</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Modulo de rotura</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Reacción álcali agregado</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Permeabilidad del concreto al agua</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Resistencia a la abrasión</li> </ul> |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

### 3. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS Y ENSAYOS DEL CONCRETO REFORZADO CON METCAOLÍN

Dicho trabajo de grado está ligado completamente al concreto, material que lleva gran cantidad de años en el mundo -algunas investigaciones tienen hallazgos antiguos en el uso de mezclas cementantes los años 7000 y 6000 antes de cristo (Osorio, 2010)- solucionando problemas de transporte, vivienda y energía para el ser humano; es por esto que la primera etapa (como ya se dijo con anterioridad) es el diseño de mezclas con las que se trabaja, este se aprecia en la Tabla 5, diseño de mezclas elaborado por la empresa Conconcreto, el cual consiste en una mezcla tradicional usada en la empresa, cuyas relaciones son 0.51 en agua/cemento, 2.23 en arena/cemento, 2.51 en triturado/cemento y 0.012 en aditivo/cemento.

Tabla 5: Diseño de mezclas de concreto de 28MPa

| DISEÑO DE MEZCLA 280 KGF/CM <sup>2</sup> A 28 DÍAS   |                                |
|--|--------------------------------|
| MATERIAL   | CANTIDAD * M <sup>3</sup> (KG) |
| Cemento tipo I estructural Argos   | 380.00                         |
| Agua EPM   | 193.80                         |
| Arena lavada industrial Conconcreto  | 848.94                         |
| Triturado 1" Industrial Conconcreto  | 957.32                         |
| Aditivo PLASTOL HR-DF  | 4.56                           |
| Asentamiento   | 14 +/- 2cm                     |
| Se debe realizar corrección por humedad para determinar la cantidad de material a trabajar |                                |

Adicional a esto, como complemento, se aclara que para el trabajo en proceso se realiza un diseño de mezclas regido por la Norma de Sismo Resistencia Colombiana y apoyada del libro Concreto Simple del Ingeniero Gerardo Rivera, el diseño de mezcla de concreto es el siguiente:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Los pasos que se siguen para realizar el diseño de mezcla

1. Selección del asentamiento:

Debido a que el sistema de vaciado es manual, el concreto debe tener una consistencia media (plástica) lo cual permite un asentamiento entre 50 y 100 mm

2. La NSR-10 estipula que el tamaño máximo nominal del agregado grueso, pero por motivos de investigación (donde se busca la formación de probetas para ensayos) se asume un tamaño de  $\frac{3}{4}$ ".
3. Para la estimación del agua de la mezcla se tiene en cuenta la Tabla 6 donde se compara el asentamiento de la mezcla de concreto, se utiliza de 10cm, y el tamaño máximo nominal del agregado grueso (19 mm), dando un total de 180 kg de agua por m<sup>3</sup> de mezcla.

Tabla 6: Parámetros de selección de cantidad de agua en un diseño de mezclas

| ASENTAMIENTO (cm)   | CONCRETOS CON AIRE INCLUIDO    |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                     | TAMANOS MÁXIMOS NOMINALES (mm) |     |     |     |     |     |     |
|                     | 10                             | 13  | 19  | 25  | 38  | 50  | 75  |
| 0,0 – 2,5           | 175                            | 170 | 155 | 150 | 135 | 130 | 120 |
| 3,0 – 5,0           | 180                            | 175 | 165 | 160 | 145 | 140 | 135 |
| 5,5 – 7,5           | 190                            | 185 | 175 | 170 | 155 | 150 | 145 |
| 8,0 – 10,0          | 200                            | 190 | 180 | 175 | 165 | 155 | 150 |
| 10,5 – 15,0         | 210                            | 195 | 185 | 180 | 170 | 160 | 155 |
| 15,5 – 18,0         | 215                            | 205 | 190 | 185 | 175 | 165 | 160 |
| % CONTENIDO DE AIRE | 8,0                            | 7,0 | 6,0 | 5,0 | 4,5 | 4,0 | 3,5 |

4. Se define la resistencia a utilizar, que en el caso de estudio es de 28 MPa, y por motivos de la pérdida de resistencia en elaboración se calcula una resistencia promedio según lo indica la tabla C.5.3.2.2 de la NSR-10 (Ministerio de ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial, 2010), donde se especifica que para f'c entre 21 y 35 MPa se emplea la siguiente ecuación:

$$f'_{cr} = f'c + 8.3$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Siendo  $f'_c$  la resistencia especificada a la compresión y  $f'_{cr}$  la resistencia promedio requerida a la compresión, que para el caso será:

$$f'_{cr} = 36.3 \text{ MPa}$$

- Para la selección de la relación A/C se tiene en cuenta la resistencia y la durabilidad que se requiere en la estructura (Rivera L.). La norma NSR-10 da unos parámetros que ayudan en la elección de la relación A/C según las condiciones donde el concreto estará (ver Tabla 7 y Tabla 8).

Por condiciones del trabajo investigativo se optara por (Rivera L.):

$$\text{A/C por durabilidad} = \text{A/C por resistencia} = 0.50$$

Tabla 7: Requisitos para condiciones especiales de exposición (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1999)

| Condiciones de exposición  | Máxima relación A/C | Resistencia mínima a la compresión $F'_c$ , en Mpa |
|--|---------------------|--|
| Concreto de baja permeabilidad para ser expuesto al agua ( AGUA DULCE).  | 0,50                | 24   |
| Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y descongelamiento en una condición húmeda, o a químicos que impidan el congelamiento (AGUA SALINA). | 0,45                | 31   |
| Para la protección contra la corrosión del refuerzo de concreto expuesto a cloruros, sal, agua salina o que puede ser salpicado por agua salina. | 0,40                | 35   |

Tabla 8: Requisitos para concretos expuestos a soluciones que contienen sulfatos (Ministerio de ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial, 2010)

| Exposición a sulfato | Sulfatos solubles en agua ( $SO_4$ ) en el suelo porcentaje en masa | Sulfatos ( $SO_4$ ) en el agua en ppm (partes por millón) | Tipo de cemento     | Relación a/c máxima por masa (1) | Resistencia mínima a la compresión $F'_c$ en Mpa |
|----------------------|---|---|---------------------|----------------------------------|--|
| Despreciable         | 0,00 a 0,10   | 0 a 150   | -                   | -                                | -  |
| Moderada (2)         | 0,10 a 0,20   | 150 a 1500  | II (3)              | 0,50                             | 28   |
| Severa               | 0,20 a 2,00   | 150 a 10000   | V                   | 0,45                             | 32   |
| Muy severa           | Mas de 2,00   | Mas de 10000  | V con puzolanas (4) | 0,45                             | 32   |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

6. Calculo del contenido de cemento

$$C = \frac{A}{A/C} = \frac{180 \text{ Kg/m}^3}{0.50} = 360 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \text{ de concreto}$$

7. Agregados

- Volumen absoluto del agregado

Se supone:

$$\rho \text{ agua} = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho \text{ cemento} = 3010 \text{ Kg/m}^3$$

Siendo así:

$$V_{abs. agregado} = 1\text{m}^3 - \frac{180\text{Kg}}{1000 \text{ Kg/m}^3} - \frac{360\text{Kg}}{3010 \text{ Kg/m}^3} = 0.700\text{m}^3$$

- Densidad promedio del agregado

Para la densidad del agregado se tiene que:

Densidad de la arena en Industrial Concreto = 2703 Kg/m<sup>3</sup> (Concreto, 2015)

Densidad del triturado en Industrial Concreto = 2716 Kg/m<sup>3</sup> (Concreto, 2015)

Con estos datos se halla un promedio en la densidad del agregado igual a 2709.5 Kg/m<sup>3</sup>

- Masa de los agregados

$$M_{abs.agregados} = V_{abs.agregados} * \rho_{prom.agregado}$$

$$M_{abs.agregados} = 0.700\text{m}^3 * 2709.5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 1896.65\text{Kg}$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Finalmente se decide que de la masa total será compuesta por un 45% de la masa que corresponde al agregado fino (arena) y 55% de la masa corresponde al agregado grueso (triturado).

Arena = 853.5 Kg/m<sup>3</sup>

Triturado = 1043.2 Kg/m<sup>3</sup>

Finalmente el material requerido para 1 m<sup>3</sup> de mezcla es el que se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9: Diseño de mezclas elaborado por efectos investigativos

| Material   | Cantidad por 1 m <sup>3</sup> de mezcla en Kg |
|--|---|
| Cemento  | 360   |
| Agua   | 180   |
| Arena  | 853.5   |
| Triturado  | 1043.2  |
| La mezcla es para que se logre una resistencia de 28 MPa a los 28 días con un asentamiento durante elaboración de 10 cm. |   |

Para cada mezcla se realizan sustituciones de 5%, 10%, 15% y 20% de metacaolín (ver el **Anexo 1** para encontrar las cantidades de metacaolín agregadas en cada procedimiento).

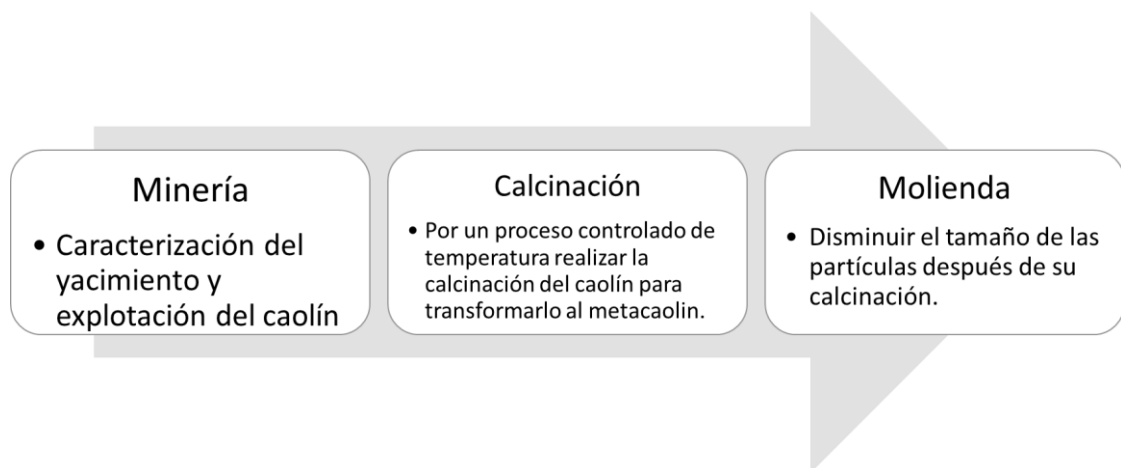
Para el proceso de mezclado en sitio se deben corregir las humedades de los agregados (tanto arena como triturado) para no agregar mayor o menor cantidad de agua a la mezcla y modificar su resistencia, (recordar que a mayor relación agua/cemento la resistencia del concreto caerá).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Como complemento se tiene que:

- El plastol HR-DF es un aditivo reductor de agua, diseñado para producir concreto de alto desempeño, incrementando el asentamiento o reduciendo significativamente el agua y/o cemento, es recomendado cuando se requieren acabados excelentes. Además para el proceso puede ayudar en que reduce la permeabilidad del concreto (Euclid Chemical TOXEMENT, 2009)
- El metacaolín es más conocido en el medio como FORTACRET, este es un material extraído de materias primas naturales, usado como un cementante (puzolana cementante), y finamente molido (CORONA, 2015).

El proceso de obtención del metacaolín es relativamente simple (ver Gráfica 2).



Gráfica 2: Proceso extracción y elaboración del metacaolín

El uso de este material ha demostrado que genera ventajas importantes al concreto como el desarrollo de mayor resistencia a la compresión, disminución en el calor de hidratación en vaciados masivos, disminución de la reacción alcali-agregado, disminución a los daños por ataques de sulfatos y cloruros, otorga mayor durabilidad del concreto (volviendo el concreto menos poroso), disminución de la permeabilidad y reducción de la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> (CORONA, 2015).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

El material que se usa en la elaboración de los concretos de la tesis es el FORTACERT 10 de Corona, en el

**Anexo 2** se evidencia la ficha tecnica del material.

## REALIZACIÓN DE MEZCLAS

Para la producción de los concretos se estableció como espacio el laboratorio de estructuras de la Escuela de Ingeniería de Antioquia sede las palmas, se trabajó con una concretadora de 1.5 sacos de cemento por lo que se realizan vaciados diferentes para cilindros de concreto y otro para las vigas que fueron utilizadas para los ensayos de módulo de rotura.

Para efectuar de forma debida el proceso se tiene un diseño de experimento elaborado con parte de inicio del proceso, es decir, con la Tabla 10 se da el comienzo al proceso de la elaboración del trabajo, en esta tabla se resumen todo los procesos a realizarse, es decir, se encuentran los siguientes aspectos:

Tabla 10: Diseño de experimentos

| LUGAR REALIZACIÓN ENSAYOS |                                 |        | EIA                  |          |          | CONTECON         |         | SUMICOL                  | SUMICOL               | SUMICOL                   |
|---------------------------|---------------------------------|--------|----------------------|----------|----------|------------------|---------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|
|                           |                                 |        | CANTIDAD DE MUESTRAS |          |          |                  |         |                          |                       |                           |
|                           |                                 |        | COMPRESIÓN           |          |          | MÓDULO DE ROTURA |         | REACCIÓN ALCALI AGREGADO | PERMEABILIDAD AL AGUA | RESISTENCIA A LA ABRASIÓN |
| RESISTENCIA (Mpa)         | RELACIÓN A/C                    | MEZCLA | 28 DÍAS              | 56 DÍAS  | 90 DÍAS  | 56 DÍAS          | 90 DÍAS |                          |                       |                           |
| 28                        | Definida en el diseño de mezcla | PATRON | 3                    | 3        | 3        | 3                | 3       | 3                        | 3                     | 3                         |
|                           |                                 | 5% MK  | 3                    | 3        | 3        | 3                | 3       | 3                        | 3                     | 3                         |
|                           |                                 | 10% MK | 3                    | 3        | 3        | 3                | 3       | 3                        | 3                     | 3                         |
|                           |                                 | 15% MK | 3                    | 3        | 3        | 3                | 3       | 3                        | 3                     | 3                         |
|                           |                                 | 20% MK | 3                    | 3        | 3        | 3                | 3       | 3                        | 3                     | 3                         |
|                           |                                 | TOTAL  | 15                   | 15       | 15       | 15               | 15      | 15                       | 15                    | 15                        |
| TOTAL                     |                                 |        | 120                  |          |          |                  |         |                          |                       |                           |
|                           |                                 |        | Cilindro             | Cilindro | Cilindro | Viga             | Viga    | Cilindro                 | Cilindro              | Cilindro                  |
| Dimensiones (m)           |                                 |        | 0.15                 | 0.15     | 0.15     | 0.50             | 0.50    | 0.15                     | 0.15                  | 0.30                      |
|                           |                                 |        | 0.30                 | 0.30     | 0.30     | 0.15             | 0.15    | 0.30                     | 0.30                  | 0.10                      |
|                           |                                 |        |                      |          |          | 0.15             | 0.15    |                          |                       |                           |
| Volumen (m3)              |                                 |        | 0.0053               | 0.0053   | 0.0053   | 0.0113           | 0.0113  | 0.0053                   | 0.0053                | 0.0071                    |

- La cantidad de muestras que se deben extraer por espécimen por fecha de falla, por lo que para tener este dato es necesario tener clara la normatividad que los rige.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

- La dimensiones de cada uno de los especímenes para sacar el volumen total de este y calcular la cantidad de material que es necesario para todo el proceso (las dimensiones también se adquieren de la norma).
- Se aprecia a su vez los lugares (empresas o instituciones) donde se llevan a cabo las fallas de los concretos según la propiedad que se desea analizar y que cumpla la norma.

Con el diseño de experimentos ya claro, los pasos que siguieron son el pedido de material y la realización de las mezclas.

En el anexo 1 se pueden observar cada una de las mezclas realizadas y las variaciones que estas tuvieron durante el proceso de elaboración en sitio.

Para cada uno de los especímenes elaborados se llevó el procedimiento de desencofrado a las 24 horas y de inmediato se sumergieron en agua para el respectivo curado, los días variaban según el ensayo que se fuera a realizar (ver Tabla 11)

Tabla 11: Tiempo de curados para las probetas según ensayo

| Nombre del ensayo                  | Tiempo de curado (días) |    |    |    |
|------------------------------------|-------------------------|----|----|----|
| Resistencia a la compresión        |                         | 28 | 56 | 90 |
| Modulo de Rotura                   |                         |    | 56 | 90 |
| Reacción álcali agregado           | 16                      |    |    |    |
| Permeabilidad del concreto al agua |                         |    | 56 |    |
| Resistencia a la abrasión          |                         |    | 56 |    |

## ENSAYOS:

### Resistencia a la compresión

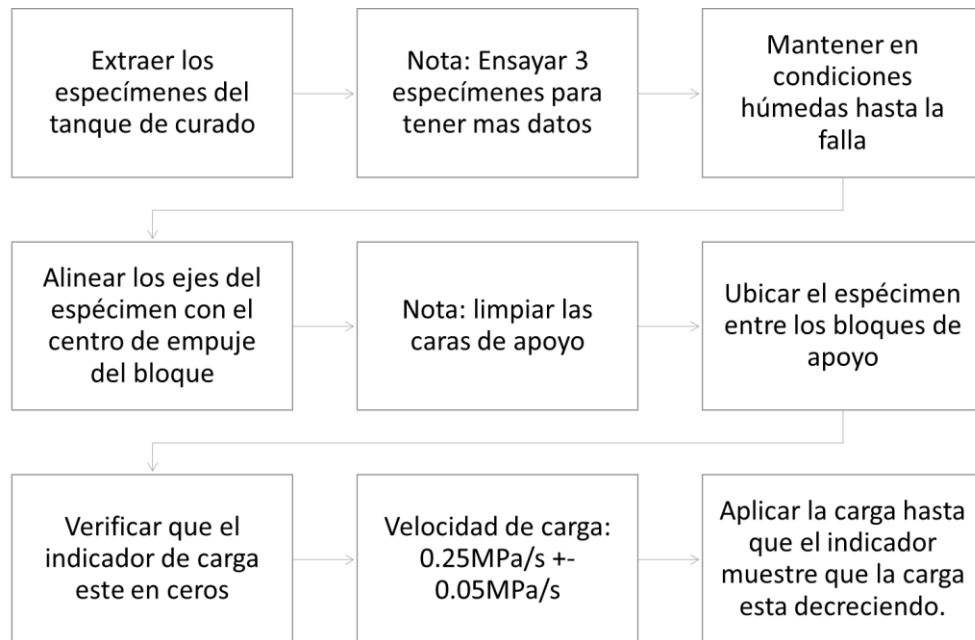
¿Qué norma lo rige?

La norma Colombiana es la NTC 673

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

¿Cómo se hace?

El procedimiento por norma se presenta en la Gráfica 3, y los especímenes que se realizaron para llevar a cabo el proceso fueron cilindros de 10cm de diámetro y 20 cm de longitud, fueron 3 especímenes para fallar en cada uno de los días definidos.



Gráfica 3: Procedimiento ensayo de compresión- Norma NTC 673 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 2012)

### **Módulo de rotura**

¿Qué norma lo rige?

La norma Colombiana NTC 2871

¿Cómo se hace?

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Los especímenes a fallar son tres vigas de 15\*15\*50 cm, una cantidad de tres por cada tiempo de falla.

La carga aplicada va en los tercios medios y se debe garantizar que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara del espécimen y aplicadas sin excentricidad, la máquina que la norma especifica para el proceso se puede ver en la Imagen 2 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1999).

El procedimiento del proceso completo se muestra en la Gráfica 4.

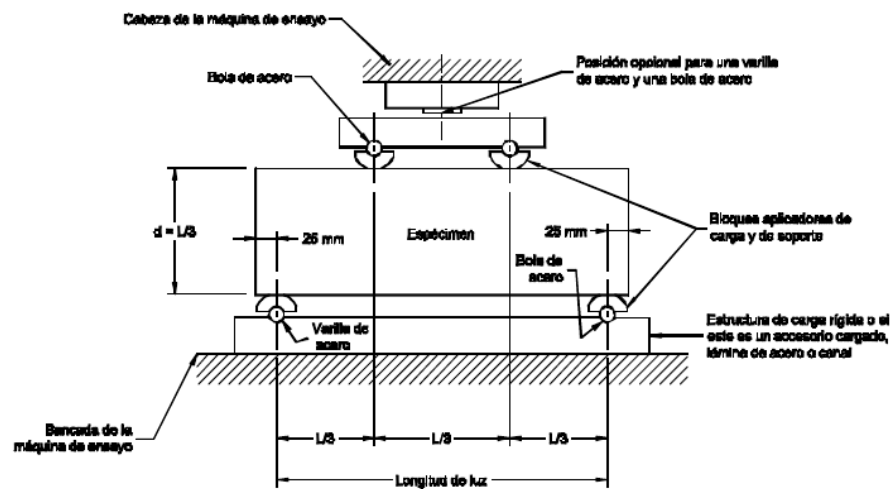
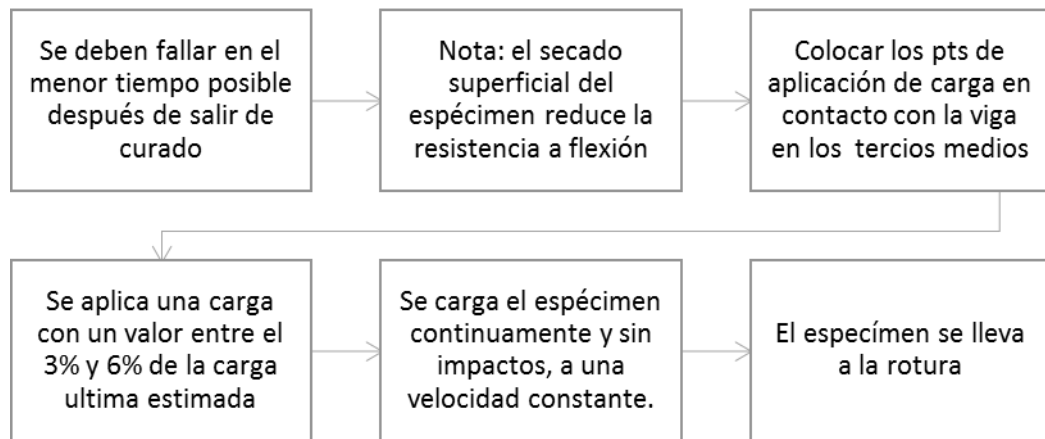


Imagen 2: Máquina de ensayo para módulo de rotura definida por la norma NTC 2871 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1999)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Gráfica 4: Procedimiento para ensayo de módulo de rotura según norma NTC 2871 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1999)

### **Reacción álcali agregado**

¿Qué norma lo rige?

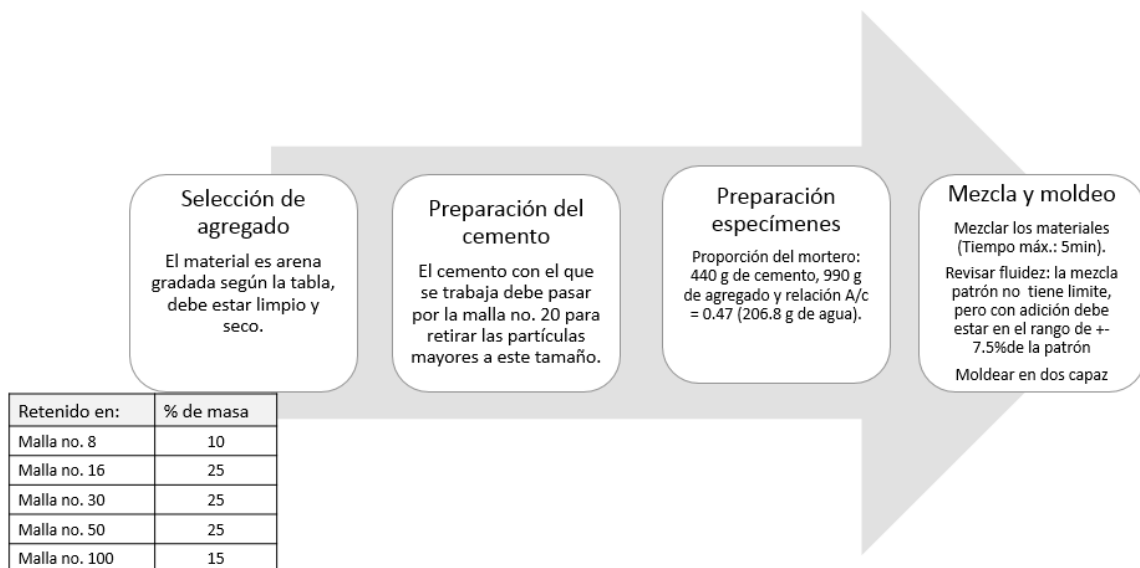
Los ensayos se realizaron según la norma americana ASTM C1260 y ASTM C1567 las cuales se diferencian en que la primera es usando simplemente cemento como cementante y la segunda es adicionando un cementante distinto, que en este caso sería el metacaolín. En cuanto a procedimiento es el mismo.

¿Cómo se hace?

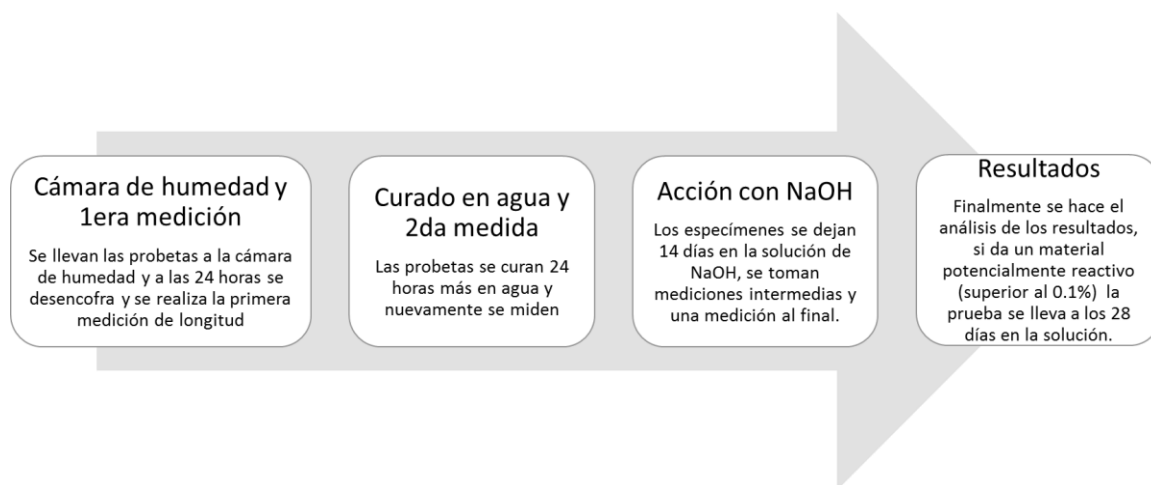
El procedimiento tiene una variación, no depende de la mezcla que se utiliza en todos los patrones, para este como su enfoque es en el agregado la norma proporciona una mezcla diferente para hacer más ágil el estudio de la propiedad.

El procedimiento se observa en la Gráfica 5 y la Gráfica 6 (es un procedimiento continuo) del cual salen 3 especímenes que se comparan y promedian al final para obtener un resultado más preciso.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Gráfica 5: Proceso (parte I) en el ensayo de RAS regido por la norma ASTM C1260 y C1567 (ASTM International, 2014)



Gráfica 6: Proceso (parte II) en el ensayo de RAS regido por la norma ASTM C1260 y C1567 (ASTM International, 2014).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



## **Permeabilidad del concreto al agua**

¿Qué norma lo rige?

La norma Colombiana es la NTC 4483

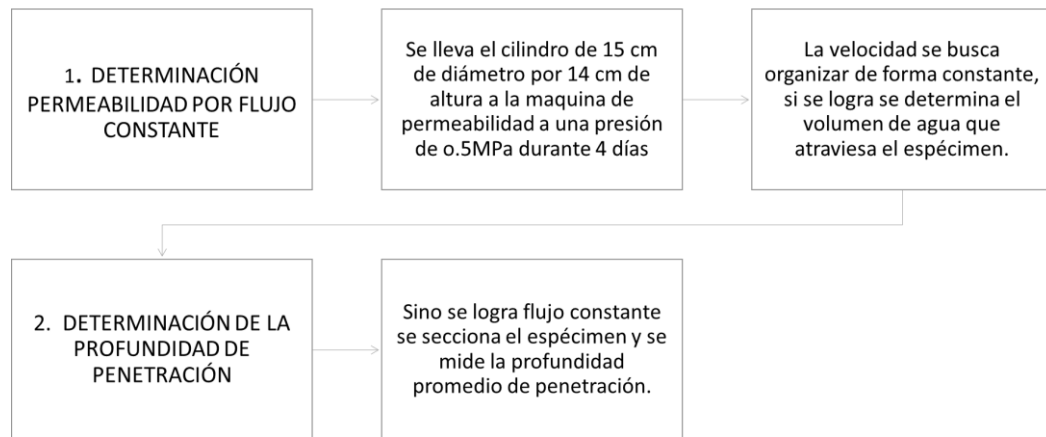
¿Cómo se hace?

El proceso se divide en dos partes, la primera se realiza siempre que se hace el proceso y según el resultado de la primera parte se inicia la segunda. El primer procedimiento se nombra determinación de la permeabilidad por flujo constante (ver Gráfica 7) donde se utiliza el equipo que se observa en la Imagen 3 y la segunda parte será la determinación de la profundidad de penetración (ver Gráfica 7).

En el último procedimiento es necesario tener conocimiento de la porosidad del concreto que se halla según la norma ASTM C642 (por lo cual será otro dato que se calcula para el procedimiento de la tesis que se está llevando acabo).

Los especímenes que se realizaron para el procedimiento fueron con la mezcla correspondiente para la tesis, 3 cilindros para cada porcentaje de metacaolín de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud que son cortados en tres partes: la más grande de longitud de 14 cm que es usada en la máquina de permeabilidad y dos partes de igual tamaño para el ensayo de porosidad. El espécimen que se prepara para la máquina de permeabilidad es cubierta con una pintura epoxica por todas sus caras, pero se deja sobre uno de sus costados un circulo de diámetro de 8 cm en el centro para que el agua ingrese.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Gráfica 7: Procedimiento para ensayo de permeabilidad según norma NTC 4483 (Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1998)

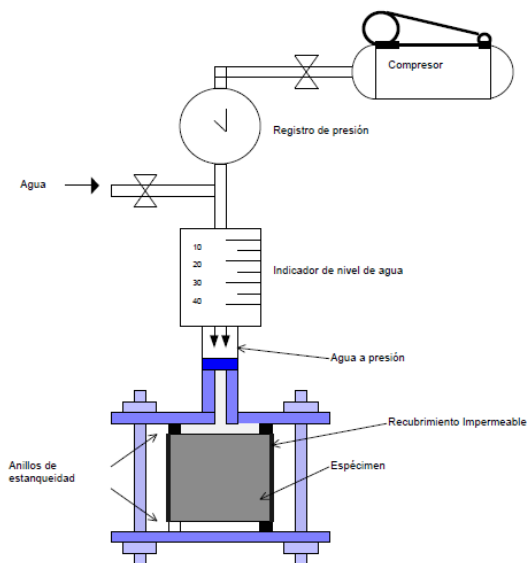


Imagen 3: Dispositivo de ensayo para calcular permeabilidad de los especímenes de concreto (Instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1998)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## Resistencia a la abrasión

¿Qué norma lo rige?

La norma americana por la cual se realizara la falla es la ASTM C 1138M

¿Cómo se hace?

El procedimiento es sencillo, se elaboran 3 especímenes de 30 cm de diámetro y 10 cm de longitud (conocidos como tortas de abrasión) que son llevadas al equipo (ver Imagen 4) y se realiza los pasos de la Gráfica 8.

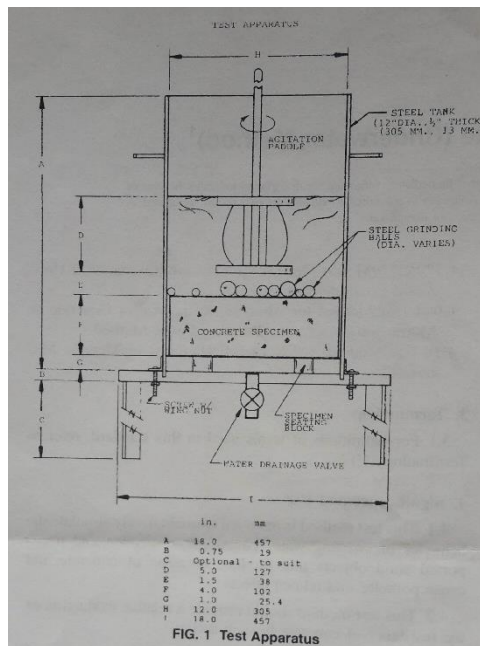
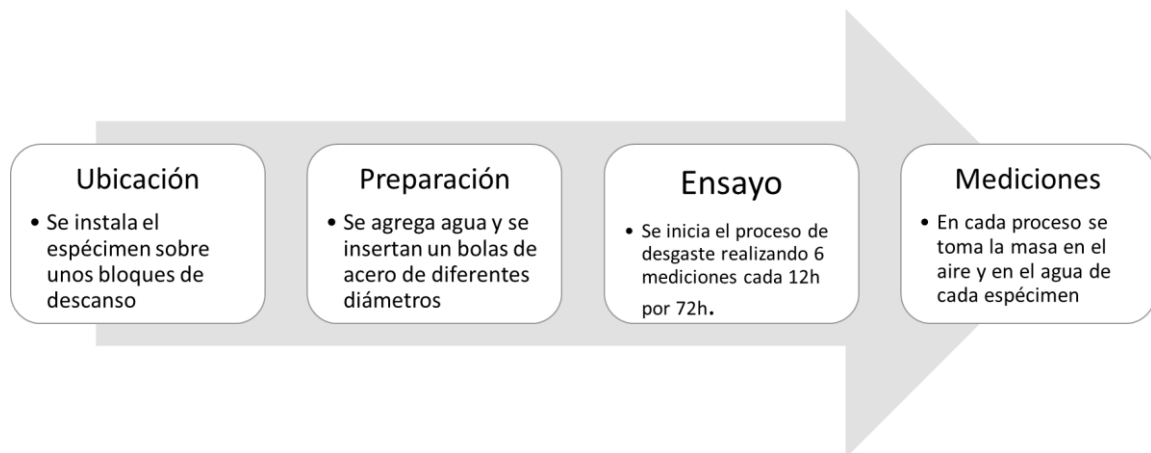


Imagen 4: Aparato para ensayo de abrasión según ASTM C1138M (ASTM international, 2012)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Gráfica 8: Procedimiento de ensayo para la resistencia a la abrasión regido por la norma ASTM C1183-M (ASTM international, 2012)

## 4. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO REFORZADO CON METACAOLÍN

### Resistencia a la compresión

Mezcla patrón

Hasta la fecha se tiene 2 fallas para la resistencia a la compresión, 3 cilindros a los 28 días y 2 cilindros a los 56 días, para cada una de las mezclas ensayadas.

Los resultados para la mezcla patrón, se pueden apreciar en la Tabla 12 y en la Tabla 13. Se observa que el comportamiento de las resistencias obtenidas, es consistente con el esperado según el aumento por edades, ya que a los 28 días se obtiene en promedio 50 MPa y a los 56 días un promedio de 52 MPa, es decir, hay un leve aumento en la resistencia.

Tabla 12: Resultados ensayo a compresión- mezcla patrón (28 días) (ver **Nota 2** para explicación)

| Curado de 28 días        | Cilindro no. |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|
|                          | 1            | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | 50.130       | 52.130 | 49.880 |
| Promedio (Mpa)           | 50.713       |        |        |
| Tolerancia               | 5.376        |        |        |
| Tolerancia min           | 45.338       |        |        |
| Tolerancia max           | 56.089       |        |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 50.130       | 52.13  | 49.88  |
| Promedio (Mpa) real      | 50.713       |        |        |

**Nota 2: Realización de lectura de las tablas de resultados de las fallas a compresión**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

*En la tabla se encuentra el promedio de los tres especímenes, se extrae la tolerancia según la norma NTC 673 que acepta una variación de  $\pm 10.6\%$ , y en las siguientes dos celdas se encuentra el valor de aceptación por debajo y por encima, finalmente aparecen los datos aceptados según la tolerancia y el promedio con que se trabajara de aquí en adelante.*

Tabla 13: Resultados ensayo a compresión- mezcla patrón (56 días) (ver **Nota 2** para explicación).

| Curado de 56 días        | Cilindro no. |        |
|--------------------------|--------------|--------|
|                          | 1            | 2      |
| MPa (directo de maquina) | 52.260       | 53.340 |
|                          |              |        |
| Promedio (Mpa)           | 52.800       |        |
| Tolerancia               | 5.597        |        |
| Tolerancia min           | 47.203       |        |
| Tolerancia max           | 58.397       |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      |
| Datos aceptados          | 52.260       | 53.34  |
| Promedio (Mpa) real      | 52.800       |        |

Mezcla con adición

Adición del 5% de metacaolín

Cuando se realiza la adición en este porcentaje se espera que el aumento de resistencia a la compresión en comparación con la mezcla patrón no varíe significativamente, y de acuerdo con los resultados obtenidos (ver Tabla 14 y Tabla 15) los valores de resistencia son muy similares a los valores de la mezcla patrón. Sólo presentan una variación de 2,8% para 28 días y 8,1% para 56 días.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 14: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 5% MK (28 días) (ver Nota 1 para explicación)

| Curado de 28 días        | Cilindro no. |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|
|                          | 1            | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | 50.740       | 48.070 | 48.920 |
| Promedio (Mpa)           | 49.243       |        |        |
| Tolerancia               | 5.220        |        |        |
| Tolerancia min           | 44.024       |        |        |
| Tolerancia max           | 54.463       |        |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 50.740       | 48.07  | 48.92  |
| Promedio (Mpa) real      | 49.243       |        |        |

Tabla 15: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 5% MK (56 días) (ver Nota 1 para explicación)

| Curado de 56 días        | Cilindro no. |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|
|                          | 1            | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | 47.980       | 50.840 | 46.640 |
| Promedio (Mpa)           | 48.487       |        |        |
| Tolerancia               | 5.140        |        |        |
| Tolerancia min           | 43.347       |        |        |
| Tolerancia max           | 53.626       |        |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 47.980       | 50.84  | 46.64  |
| Promedio (Mpa) real      | 48.487       |        |        |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

### Adición del 10% de metacaolín

Las resistencias obtenidas a 28 y 56 días para los concretos adicionados con el 10 % de metacaolín, fueron en promedio 45.070 MPa y 45.320 MPa respectivamente (ver Tabla 16 y Tabla 17).

Tabla 16: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 10% MK (28 días) (ver Nota 1 para explicación)

| Curado de 28 días        | Cilindro no. |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|
|                          | 1            | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | 37.600       | 45.070 | 45.320 |
| Promedio (Mpa)           | 42.663       |        |        |
| Tolerancia               | 4.522        |        |        |
| Tolerancia min           | 38.141       |        |        |
| Tolerancia max           | 47.186       |        |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 0.000        | 45.070 | 45.320 |
| Promedio (Mpa) real      | 45.195       |        |        |

Tabla 17: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 10% MK (56 días) (ver Nota 1 para explicación)

| Curado de 56 días        | Cilindro no. |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|
|                          | 1            | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | 44.040       | 41.620 | 47.740 |
| Promedio (Mpa)           | 44.467       |        |        |
| Tolerancia               | 4.713        |        |        |
| Tolerancia min           | 39.753       |        |        |
| Tolerancia max           | 49.180       |        |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 44.040       | 41.620 | 47.740 |
| Promedio (Mpa) real      | 44.467       |        |        |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



## Adición del 15% de metacaolín

En la Tabla 18 y Tabla 19 se muestran los datos obtenidos por las fallas a 28 y 56 días respectivamente para la mezcla de concreto con adición de 15 % de metacaolín.

El resultado promedio para la resistencia a la compresión a 28 días es de 42,417 MPa y a 56 días es de 45,543 MPa.

Tabla 18: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 15% MK (28 días) (ver Nota 1 para explicación)

| Curado de 28 días        | Cilindro no. |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|
|                          | 1            | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | 42.620       | 40.920 | 43.710 |
| Promedio (Mpa)           | 42.417       |        |        |
| Tolerancia               | 4.496        |        |        |
| Tolerancia min           | 37.921       |        |        |
| Tolerancia max           | 46.913       |        |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 42.620       | 40.920 | 43.710 |
| Promedio (Mpa) real      | 42.417       |        |        |

Tabla 19: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 15% MK (56 días) (ver Nota 1 para explicación)

| Curado de 56 días        | Cilindro no. |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|
|                          | 1            | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | 44.680       | 47.180 | 44.770 |
| Promedio (Mpa)           | 45.543       |        |        |
| Tolerancia               | 4.828        |        |        |
| Tolerancia min           | 40.716       |        |        |
| Tolerancia max           | 50.371       |        |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 44.680       | 47.180 | 44.770 |
| Promedio (Mpa) real      | 45.543       |        |        |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

### Adición de 20% de metacaolín

Los datos obtenidos en las fallas realizadas para las adiciones de 20% de metacaolín se aprecian en la Tabla 20 y la Tabla 21.

La resistencia promedio para 28 días es de 33.630 MPa y para los 56 días es de 37.035 MPa.

Tabla 20: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 20% MK (28 días) (ver Nota 1 para explicación)

| Curado de 28 días        | Cilindro no. |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|
|                          | 1            | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | 34.760       | 33.100 | 33.030 |
| Promedio (Mpa)           | 33.630       |        |        |
| Tolerancia               | 3.565        |        |        |
| Tolerancia min           | 30.065       |        |        |
| Tolerancia max           | 37.195       |        |        |
| Especimen no.            | 1            | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 34.760       | 33.100 | 33.030 |
| Promedio (Mpa) real      | 33.630       |        |        |

Tabla 21: Resultados ensayo a compresión- mezcla adición 20% MK (56 días) (ver Nota 1 para explicación)

| Curado de 56 días        | Cilindro no.    |        |        |
|--------------------------|-----------------|--------|--------|
|                          | 1               | 2      | 3      |
| MPa (directo de maquina) | Dato mal tomado | 38.530 | 35.540 |
| Promedio (Mpa)           | 38.530          |        |        |
| Tolerancia               | 4.084           |        |        |
| Tolerancia min           | 34.446          |        |        |
| Tolerancia max           | 42.614          |        |        |
| Especimen no.            | 1               | 2      | 3      |
| Datos aceptados          | 0.000           | 38.530 | 35.540 |
| Promedio (Mpa) real      | 37.035          |        |        |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

De forma más ágil para el análisis de datos y a modo de conclusión se presenta la Tabla 22, en esta se observan los datos promedio aceptados por la norma y los cuales serán llevados a estudio como resultado final de la toma del ensayo.

Tabla 22: Resultados completos ensayos de compresión a 28 y 56 días

| Patron            |   |       |       |           |
|-------------------|---|-------|-------|-----------|
| Dias              | 0 | 28    | 56    | 90        |
| Resistencia (Mpa) | 0 | 50.71 | 52.80 | En curado |
| 5MK               |   |       |       |           |
| Dias              | 0 | 28    | 56    | 90        |
| Resistencia (Mpa) | 0 | 49.24 | 48.49 | En curado |
| 10MK              |   |       |       |           |
| Dias              | 0 | 28    | 56    | 90        |
| Resistencia (Mpa) | 0 | 45.20 | 44.47 | En curado |
| 15MK              |   |       |       |           |
| Dias              | 0 | 28    | 56    | 90        |
| Resistencia (Mpa) | 0 | 42.42 | 45.54 | En curado |
| 20MK              |   |       |       |           |
| Dias              | 0 | 28    | 56    | 90        |
| Resistencia (Mpa) | 0 | 33.63 | 37.04 | En curado |

### Módulo de rotura

Para la obtención de estos datos las mezclas se realizaron en sitio, como se dijo antes (ver mezclas realizadas en Anexo 1), y se enviaron a la empresa Contecon para su falla, los resultados totales arrojados se pueden ver en el **Anexo 4**.

#### Mezcla patrón

El módulo de rotura para la mezcla patrón a 56 días es de 4.65 MPa y a los 90 días de 5.10 MPa en promedio (ver Tabla 23) representando el 8.8% de la resistencia a compresión (Tabla 24) y el 9.6% (Tabla 25) respectivamente, estando por debajo de los

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

resultados óptimos estudiados previamente al compararse con la resistencia a la compresión.

Tabla 23: Resultados módulo de rotura

|        | Resistencia a la compresión (MPa) | Resistencia a la flexión 56 días (Mpa) | Resistencia a la flexión 90 días (Mpa) |
|--------|-----------------------------------|--|--|
| Patron | 52.80                             | 4.65                                   | 5.10                                   |
| 5 MK   | 48.49                             | 4.77                                   | 5.31                                   |
| 10 MK  | 44.47                             | 4.29                                   | 4.72                                   |
| 15 MK  | 45.54                             | 5.68                                   | 5.51                                   |
| 20 MK  | 37.04                             | 4.37                                   | 4.48                                   |

Tabla 24: Relación resistencia a la flexión (56 días) y resistencia a la compresión

| Modulo de rotura vs compresión (56 días) |                             |                                   |                          |                              |
|--|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Especimen                                | Resistencia a flexion (Mpa) | Resistencia a la compresión (Mpa) | Relacion lineal (MR/F'c) | Relacion lineal (MR/F'c) (%) |
| Patron                                   | 4.65                        | 52.80                             | 0.09                     | 8.80                         |
| 5MK                                      | 4.77                        | 48.49                             | 0.10                     | 9.84                         |
| 10MK                                     | 4.29                        | 44.47                             | 0.10                     | 9.65                         |
| 15MK                                     | 5.68                        | 45.54                             | 0.12                     | 12.47                        |
| 20MK                                     | 4.37                        | 37.04                             | 0.12                     | 11.78                        |

Tabla 25: Relación resistencia a la flexión (90 días) y resistencia a la compresión

| Modulo de rotura vs compresión (90 días) |                             |                                   |                          |                              |
|--|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Especimen                                | Resistencia a flexion (Mpa) | Resistencia a la compresión (Mpa) | Relacion lineal (MR/F'c) | Relacion lineal (MR/F'c) (%) |
| Patron                                   | 5.10                        | 52.80                             | 0.10                     | 9.66                         |
| 5MK                                      | 5.31                        | 48.49                             | 0.11                     | 10.94                        |
| 10MK                                     | 4.72                        | 44.47                             | 0.11                     | 10.62                        |
| 15MK                                     | 5.51                        | 45.54                             | 0.12                     | 12.11                        |
| 20MK                                     | 4.48                        | 37.04                             | 0.12                     | 12.09                        |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

### Mezcla con adición

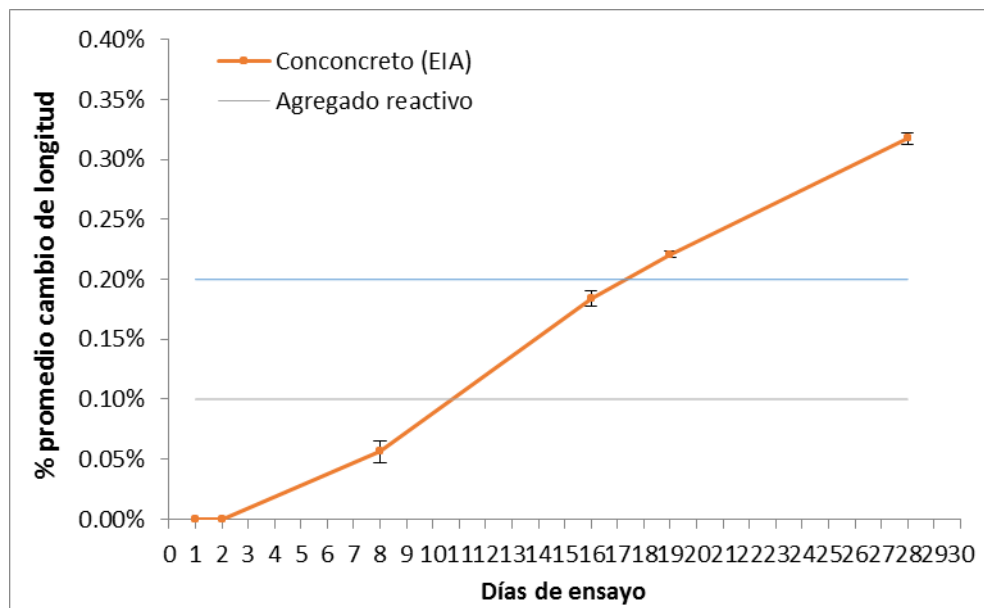
Se observa un aumento en la relación del módulo de rotura con respecto a la resistencia a la compresión (en %) para las mezclas con adición, al aumentar la cantidad de metacaolín, logrando con adiciones del 15% y 20% un aumento en el porcentaje mayor al 10 % (Tabla 24), esto al curar por 56 días los especímenes. Para las adiciones que han sido curadas por 90 días (ver Tabla 25) el cambio es notorio, llevando a la totalidad de cilindros con adición de metacaolín a estar entre el 10 y 20% de la resistencia al fallar a compresión.

### Reacción álcali agregado

#### Mezcla patrón

Con el agregado de Industrial Concreto, se obtiene para la mezcla patrón una reactividad potencialmente alta como (ver Gráfica 6) se observa en la Gráfica 9, además, a los 16 días de la culminación de la prueba, el porcentaje de expansión excedió el 0.1 % haciendo que el ensayo se llevara a los 28 días para ver el comportamiento. Resulta preocupante el resultado porque la expansión siguió en aumento (ver resultados completos en el **Anexo 3**).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Gráfica 9: Resultado RAS para mezcla patrón

El resultado demuestra que la reacción es considerable por lo cual se deben buscar medidas para su mitigación o de lo contrario el tiempo de vida de una estructura tiende a disminuir y los daños son irreversibles.

#### Mezcla con adición

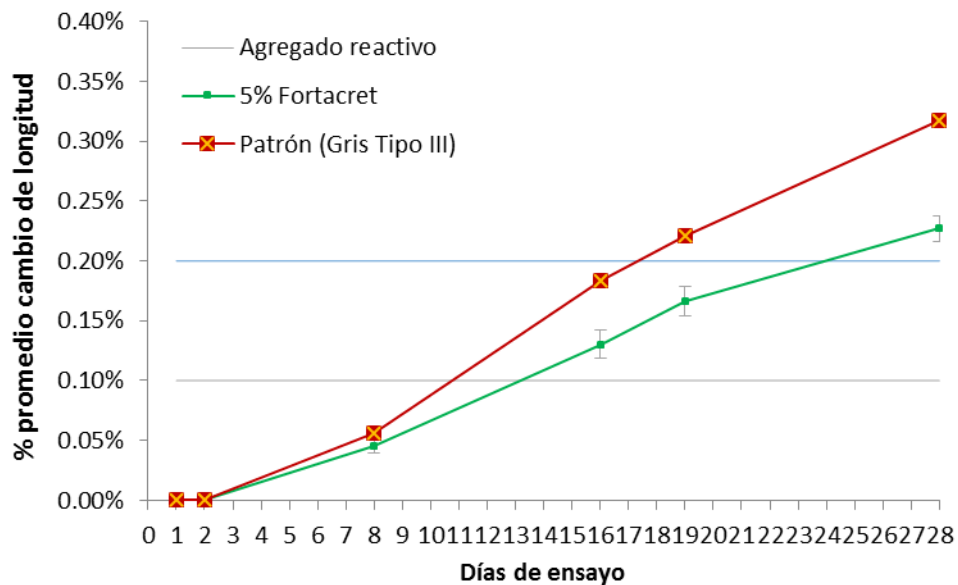
El uso del metacaolín produce una reacción con la portlandita produciendo un gel de CSH fijando los álcalis y no permitiéndoles su expansión (CORONA, 2015).

Al realizarse cada uno de los cambios en porcentaje de metacaolín establecidos se busca ver que tan eficiente es su reacción con el resto de materiales de la mezcla, es decir, si con el uso del Fortacret se logra una disminución de la reacción de los álcalis en los agregados previniendo el daño en la estructura y así, proporcionando más duración de una estructura.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

### Reemplazo del 5% de metacaolín

Con este reemplazo se obtiene lo expresado en la Gráfica 10, donde se puede observar que en comparación con los resultados de la mezcla patrón, la adición de metacaolín tiende a reducir la reactividad, es decir, ayuda a la protección de los álcalis logrando menos expansión, pero como se observa, no es suficiente el 5 % de reemplazo, ya que la mezcla sigue siendo potencialmente reactiva.

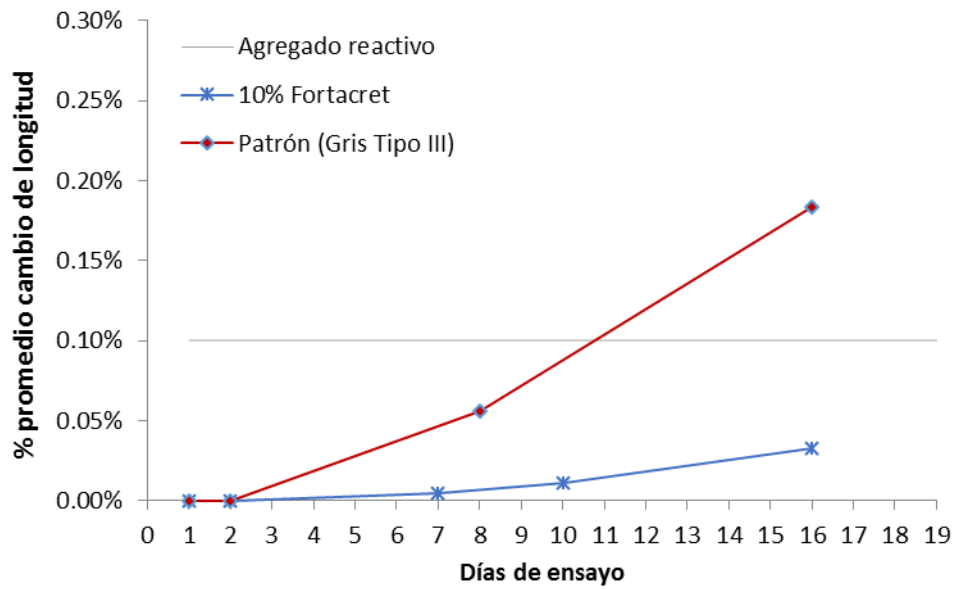


Gráfica 10: Resultado RAS con reemplazo del 5% de metacaolín

### Reemplazo del 10% de metacaolín

Al realizar el reemplazo con 10% de metacaolín se aprecia la disminución frente a la muestra patrón en cuanto a la reacción álcali agregado (ver Gráfica 11), el nuevo valor obtenido se encuentra bajo el 0.05% del cambio de longitud, un valor aceptable dentro de la normativa que rige dicho ensayo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



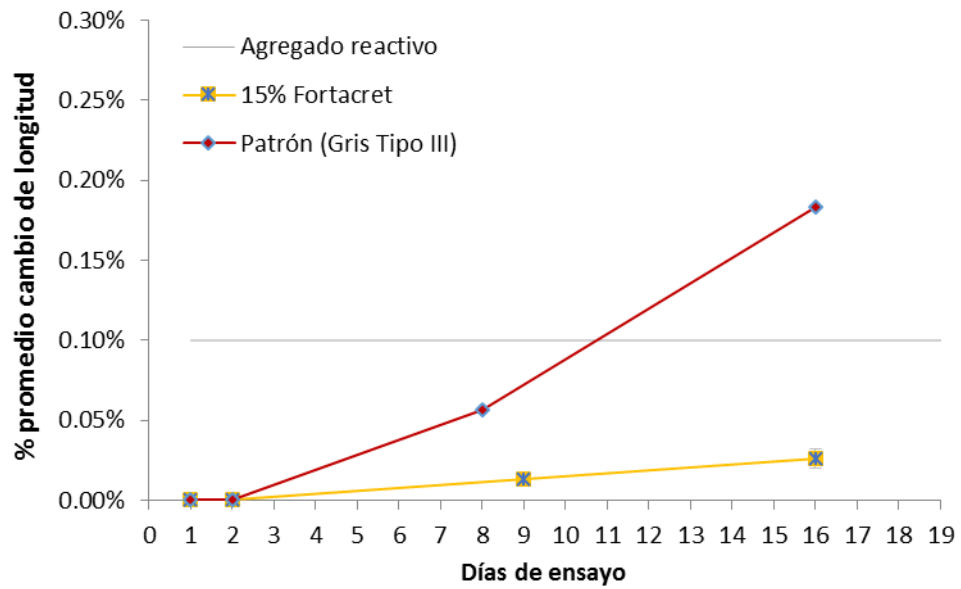
Gráfica 11: Resultado RAS con adición del 10% de metacaolín

#### Reemplazo del 15% de metacaolín

Como se observa en la Gráfica 12 el reemplazo con un 15% de metacaolín permite una disminución considerable en la reacción, convirtiendo a un concreto potencialmente reactivo como el de la mezcla patrón, en un concreto en el rango normal de expansión (0.03 %).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



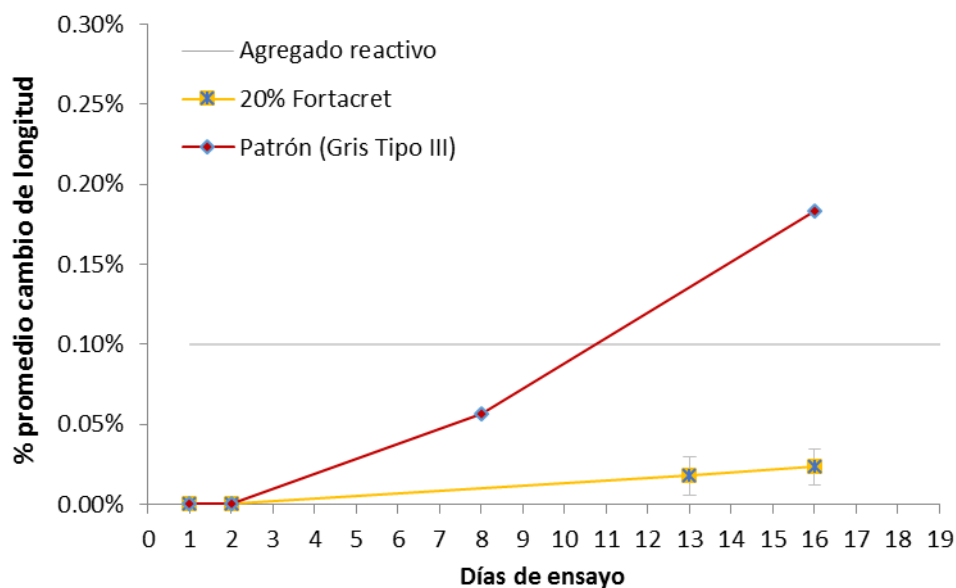


Gráfica 12: Resultado RAS con reemplazo del 15% de metacaolín

#### Reemplazo del 20% de metacaolín

Con este reemplazo, al igual que con el de 15% de metacaolín, la disminución de la reacción en comparación con la mezcla patrón da resultados favorables. Si se observa la Gráfica 13, la reacción es casi nula, por lo cual proporciona mayor durabilidad al concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Gráfica 13: Resultado RAS con reemplazo del 20% de metacaolín

### Permeabilidad del concreto al agua

En la realización del ensayo se obtienen dos datos importantes para el análisis de resultados, el primero es el volumen de agua (en  $\text{cm}^3$ ) que ingresan a cada una de las probetas en ensayo y la segunda es la medida de columna de agua (en mm) de los especímenes.

El primer dato (volumen de agua) es un valor adquirido de la maquina donde se realiza el ensayo (ver la Imagen 5, montaje del ensayo de permeabilidad para las diferentes mezclas de estudio), donde se obtienen tres valores (uno por espécimen en ensayo) (ver Anexo 5), los datos por mezcla realizada se muestran con un valor de magnitud igual por lo que se utiliza un valor exacto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 26: Determinación de la permeabilidad por flujo constante

| COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD                   |        |                                 |                           |                                    |   |
|--|--------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---|
|  |        | Datos por adición de metacaolín |                           |                                    |   |
| Datos generales                                |        | Adiciones de MK                 | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Caudal de agua (m <sup>3</sup> /s) | Coeficiente de permeabilidad al agua (m/s)- K |
| Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )         | 1000   | Patron                          | 0.00003                   | 1.73611E-10                        | 2.69856E-11                                   |
| Longitud especimen (m)                         | 0.14   | 5%                              | 0.000025                  | 1.44676E-10                        | 2.2488E-11                                    |
| Aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> ) | 9.81   | 10%                             | 0.00002                   | 1.15741E-10                        | 1.79904E-11                                   |
| Área transversal espécimen (m <sup>2</sup> )   | 0.02   | 15%                             | 0.000015                  | 8.68056E-11                        | 1.34928E-11                                   |
| Presión del agua (N/m <sup>2</sup> )           | 500000 | 20%                             | 0.00001                   | 5.78704E-11                        | 8.9952E-12                                    |

Con este valor la norma (NTC 4483) lleva a determinar el coeficiente de permeabilidad en m/s como se muestre en la Tabla 26, trabajando con la siguiente formula:

$$K = \frac{\rho * L * g * Q}{P * A}$$

Donde los datos son:

- Densidad del agua
- Longitud del espécimen (que como se explicó con antelación la maquina donde se lleva a cabo el ensayo pide 14 cm para la correcta ejecución de este)
- Aceleración de la gravedad
- Caudal del agua (se obtiene con el volumen de agua que penetra en el espécimen y los días de duración del ensayo – en total 4 días- )
- Presión de agua (estipulada en norma)
- Área transversal del espécimen

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Imagen 5: Montaje de ensayo de permeabilidad del proyecto en estudio. Imagen propia

El segundo dato obtenido es la medida de columna de agua, este valor se obtiene al abrir los especímenes y medir hasta qué punto el agua logra subir en el espécimen (ver Anexo 5), estas medidas se llevan a un promedio por espécimen ensayado y finalmente a un promedio total – esto es debido a que al momento del agua ingresar no recorre el espécimen de forma equitativa -, los valores de este proceso se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27: Medida de columna de agua en ensayo de permeabilidad

|                      | CUADRO RESUMEN |                             |       |       |          |
|----------------------|----------------|-----------------------------|-------|-------|----------|
|                      |                | Medida columna de agua (mm) |       |       |          |
|                      | Probeta no.    | 1                           | 2     | 3     | Promedio |
| <b>Adición de MK</b> | Patron         | 27.88                       | 21.40 | 25.76 | 25.01    |
|                      | 5%             | 29.07                       | 23.54 | 22.16 | 24.92    |
|                      | 10%            | 23.06                       | 20.12 | 20.08 | 21.09    |
|                      | 15%            | 15.42                       | 19.40 | 12.66 | 15.83    |
|                      | 20%            | 10.37                       | 10.44 | 14.25 | 11.69    |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

### **Resistencia a la abrasión (resistencia a la erosión)**

El motivo del retraso para los ensayos de resistencia a la abrasión, es la falta de disponibilidad que se tiene en el equipo para la prueba.

Vale la pena aclarar que la empresa donde se lleva a cabo los ensayos es certificada pero no presta un servicio como tal para elaboración de ensayos (se trata de un área de investigación). La entidad permitió el trabajo dentro de sus instalaciones y por ende es necesario acoplarse a los tiempos de esta y sus espacios.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## **5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES**

### **Resistencia a la compresión y a la flexión**

1. Al analizar los resultados presentados en el ítem anterior se observa que los resultados obtenidos con los especímenes que se fallaron para resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, no han arrojado lo esperado, por lo que al analizar a fondo los datos, se encontraron los motivos de dichos resultados, lo que permite utilizarlos como punto de partida para nuevas experimentaciones.

Las resistencias a la compresión mostraron un decrecimiento con el aumento de la cantidad de adición de metacaolín (ver Gráfica 14). De acuerdo con la bibliografía, se esperaba que con la adición de 5% de metacaolín, no se tuviera un aumento considerable de la resistencia en comparación con la mezcla patrón. Para las adiciones de 10% y 15% de metacaolín, se esperaba un aumento de resistencia con relación a la mezcla patrón, y con el 20% nuevamente no se percibieran cambios en la resistencia comparada con la obtenida para la adición del 15%.

Se estima que no se obtuvieron los resultados esperados por las siguientes razones:

- Debido a la falta de capacidad de la concretadora con la que se contaba inicialmente, las mezclas de concreto no cumplían con la trabajabilidad requerida para la correcta conformación de las probetas, por lo que se descartaron varias mezclas, lo que ocasionó que el desperdicio real fuera superior al desperdicio considerado en el diseño de experimentos. Esto condujo a que se tuviera que hacer un nuevo pedido de material para ajustar la cantidad faltante. Por esta razón, se trabajó con dos lotes de cemento Argos. El primer lote se usó para la fabricación de la mezcla patrón y para la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

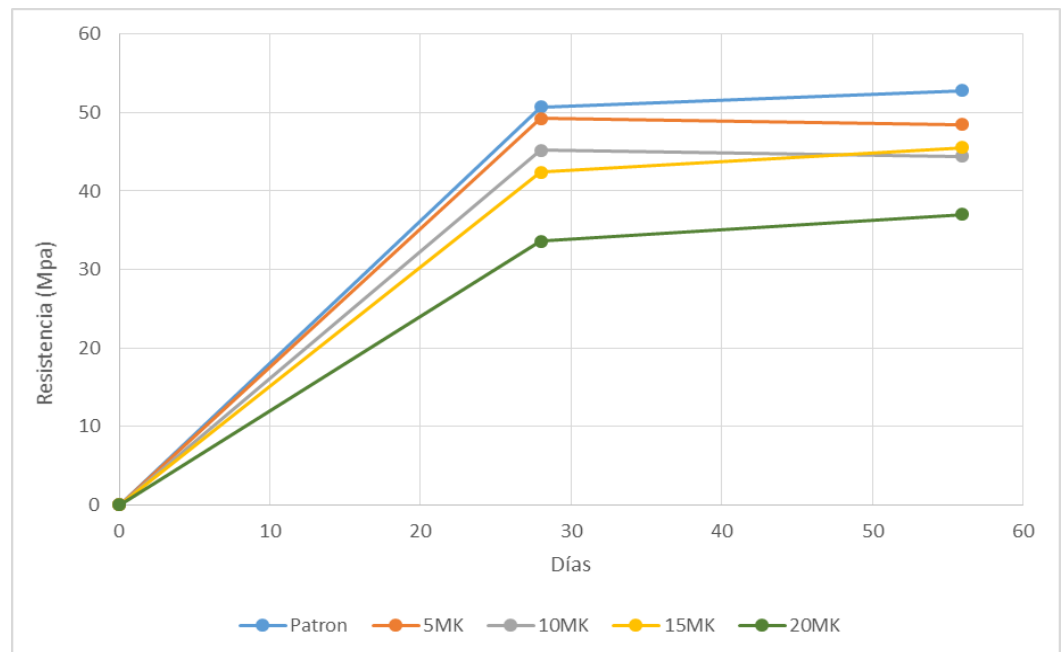
mezcla con adición de 5% de metacaolín, y el segundo lote se usó para el resto de las mezclas (adiciones de 10%, 15% y 20%).

En Industrial Conconcreto, se usa el mismo diseño de mezcla usado para esta tesis, al cual se le hace un control de calidad periódico, con el fin de regular la cantidad de cemento usado. De acuerdo a los datos suministrados de estos controles de calidad, se encontró que para el primer lote de cemento en una mezcla con 340 Kg de cemento por  $m^3$ , se obtuvo una resistencia de 388  $Kgf/cm^2$  y con el segundo lote, para el mismo contenido de cemento, se obtuvo una resistencia de 324  $Kgf/cm^2$ , lo cual permite deducir que el segundo lote corresponde a un cemento con menor resistencia, lo que podría explicar la disminución en las resistencias para las mezclas a partir de una adición del 10% de metacaolín.

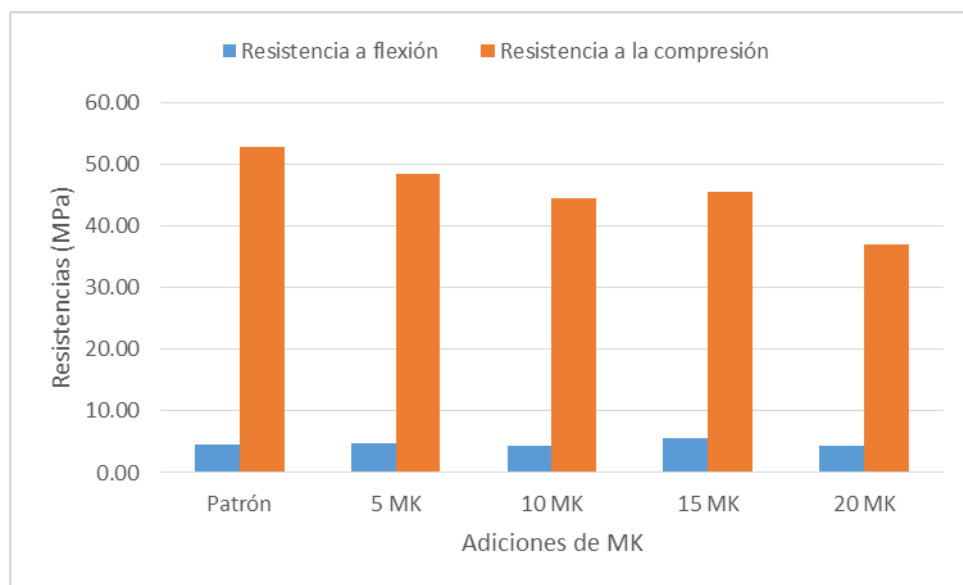
En este punto vale la pena aclarar que una de las lecciones aprendidas más importante es que para este tipo de experimentación es bueno tener gran cantidad de material disponible que provenga de un mismo lote y a su vez la maquinaria apropiada para evitar desperdicios de este al máximo, además de las condiciones reglamentarias para la seguridad y salud.

- Debido a inconvenientes presentados con los equipos usados para el calentamiento del tanque de curado, no fue posible garantizar la condición de curado bajo los requisitos de temperatura establecidos por la norma. Las temperaturas bajas (temperatura ambiente de la Escuela de Ingeniería de Antioquia), pueden afectar la obtención de las resistencias en el concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Gráfica 14: Resumen de resultados de ensayos a compresión con los diferentes porcentajes de adición de metacaolín.



Gráfica 15: Resumen de resultados de resistencia a la flexión a los 56 días de curado

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



- Para mejorar la trabajabilidad de las mezclas, se utilizó el aditivo Plastol HR-DF, en una proporción de 1,2% de material cementante, cantidad requerida para la mezcla de Industrial Concreto, usada en este trabajo. Esta es la cantidad máxima permitida de acuerdo con la ficha técnica del producto (ver Anexo 6). Durante la experimentación, se encontró que esta cantidad de aditivo no era suficiente para conseguir la trabajabilidad requerida para la conformación de las probetas para las adiciones de 10%, 15% y 20% de Metacaolín. Por lo que se tuvo que adicionar más agua a las mezclas para conseguir dicha trabajabilidad, lo que ocasionó un aumento en la relación agua cemento de estas mezclas, lo cual también pudo afectar los valores de resistencia a la compresión y a la flexión (ver Gráfica 15).

Para mejorar este proceso se recomienda el uso del Plastol HR-DM, iniciando con una proporción más baja en el diseño, que pueda ser aumentada, según se requiera para mejorar la trabajabilidad de las mezclas con adición de metacaolín (ver Anexo 7), ya que este aditivo es un reductor de agua de alto rango.

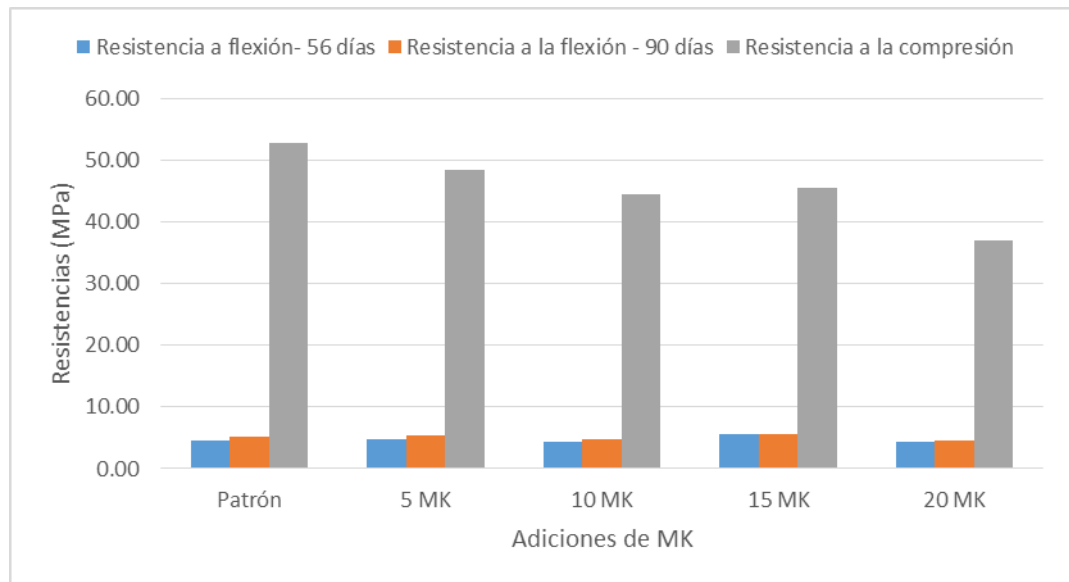
- Otro aspecto, pero muy ligado al ítem anterior esta el empaquetamiento de los cilindros y viguetas, es decir, al tener una mezcla poco o nada fluida no es posible lograr una compactación adecuada, lo que permite la producción de vacíos dentro de los cilindros y viguetas, que pueden ocasionar errores al momento de realizar la falla, por ejemplo en los ensayos a flexión se encontraron fallas inmediatas debido a la porosidad de estas (ver Anexo 4).

En los ensayos a compresión, esta falta de empaquetamiento, se pudo evidenciar, de acuerdo con los tipos de falla obtenidos. Los tipos de falla más comunes observados en los cilindros fallados, fueron de tipo 3 (fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos por conos mal formados), tipo 5 (fracturas en los lados de las partes superiores o inferiores que ocurren comúnmente con cabezales no adheridos), tipo 6 (similar al tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo), y una falla que es difícil de ver por su desmoronamiento total es la tipo 4 (fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos); de acuerdo a la norma NTC 673 (ver

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Anexo 8).

- Por último, respecto a la resistencia a flexión se obtiene un incremento en su resistencia a los 90 días de curado en comparación con las fallas realizadas a los 56 días de curado (ver Gráfica 16) ; se sobreentiende que con el paso del tiempo el concreto va adquiriendo una mayor resistencia. Como se dijo con antelación, con los resultados obtenidos a los 90 días de curar los especímenes la totalidad de las vigas realizadas con las mezclas con adición se cumple que la resistencia a flexión da entre un 10 y 20% de la resistencia a la compresión.



Gráfica 16: Resumen de resultados de resistencia a la flexión vs. Resistencia a la compresión

### Reacción álcali – agregado (RAS)

De acuerdo con la Gráfica 17 se concluye que:

1. Se observa una leve disminución en el porcentaje promedio del cambio de longitud en la mezcla con 5% de metacaolín, comparada con la mezcla patrón; lo que significa que con esta adición, se nota una disminución en la reacción del

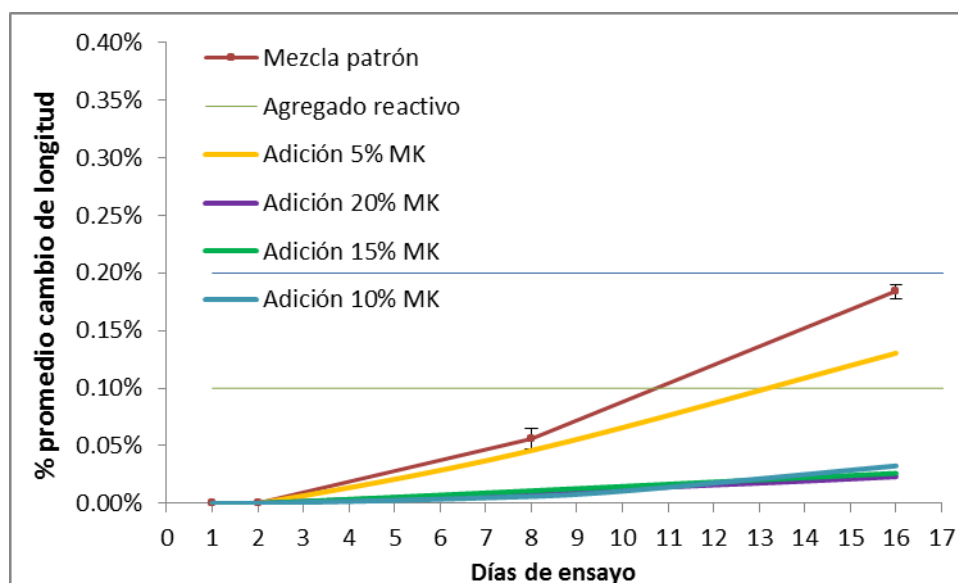
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

agregado con la solución de NaOH. El porcentaje de cambio de longitud obtenido, está por encima del 0,1%, lo que ubica esta mezcla dentro del rango de potencialmente reactiva.

2. Con una adición del 10% de metacaolín el cambio de la mezcla es significativo, saliendo del margen de un concreto potencialmente reactivo a uno donde la reacción es menor al 0.05% en el cambio de la longitud, lo cual indica una mezcla apropiada.
3. Para la adición del 15%, se aprecia una gran disminución en el porcentaje promedio de cambio de longitud, comparada con la mezcla patrón. Este porcentaje está por debajo del 0,1%, localizando esta mezcla fuera del rango de potencialmente reactiva.
4. El porcentaje promedio de cambio de longitud, es prácticamente igual para las adiciones de 10%, 15% y 20% de metacaolín, lo que permite concluir que para sustituciones mayores al 10%, no se obtienen cambios considerables frente a la reacción álcali agregado de las mezclas. Esto convierte a la adición del 10%, en el porcentaje de adición máximo para obtener los mayores beneficios en cuanto a la disminución de la reactividad.
5. De acuerdo con lo anterior, se concluye que el metacaolín es un cementante que permite aumentar la durabilidad de las estructuras de concreto, trayendo consigo mayores años de uso contra un menor costo de mantenimiento. Además como se dijo antes una falla por reacción álcali agregado es fatal para una estructura en especial para aquellas en constante contacto con agua.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Resumen ensayo reacción álcali agregado Resumen ensayo reacción álcali agregado Resumen  
ensayo reacción álcali agregado



Gráfica 17: Resumen ensayo reacción álcali agregado

6. Actualmente el costo de un bulto de cemento Argos estructural de 50 kg esta alrededor de \$29000 más IVA y el costo de Fortacret es de \$980 más IVA el kg. En la Tabla 28 se observa el costo de material cementante por metro cúbico para las diferentes mezclas usadas. De acuerdo con los costos y los beneficios obtenidos en los resultados de RAS, el porcentaje de sustitución óptimo sería el 10%.

Tabla 28: Costos del concreto elaborado con las diferentes adiciones de metacaolín

| Mezcla | Costo cemento/ m <sup>3</sup> | Costo mk/m <sup>3</sup> | costo total material cementante/m <sup>3</sup> |
|--------|-------------------------------|-------------------------|--|
| Patrón | \$ 220,400.00                 | \$ -                    | \$ 220,400.00                                  |
| 5% MK  | \$ 209,380.00                 | \$ 18,620.00            | \$ 228,000.00                                  |
| 10% MK | \$ 198,360.00                 | \$ 37,240.00            | \$ 235,600.00                                  |
| 15% MK | \$ 190,240.00                 | \$ 55,860.00            | \$ 246,100.00                                  |
| 20% MK | \$ 176,320.00                 | \$ 74,480.00            | \$ 250,800.00                                  |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## Permeabilidad del concreto al agua

- Con los valores de coeficiente de permeabilidad al agua obtenidos (ver Tabla 26) se concluye que a partir de este dato el diseño de mezclas utilizado en los ensayos tiene una permeabilidad media (ver Tabla 29), pero al analizar más de cerca los valores es posible inferir que al adicionar mayor cantidad de metacaolín el coeficiente de permeabilidad disminuye.

Tabla 29: Relación de permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración. Tomado de: (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC, 1998)

| Determinación                         | Unidades | Permeabilidad |                         |              |
|---------------------------------------|----------|---------------|-------------------------|--------------|
|                                       |          | Baja          | Media                   | Alta         |
| Coefficiente de permeabilidad al agua | m/s      | $< 10^{-12}$  | $10^{-12}$ a $10^{-10}$ | $> 10^{-10}$ |
| Profundidad de penetración            | mm       | $< 30$        | 30 a 60                 | $> 60$       |

- Igualmente los valores de la Tabla 27 se llevan a la Tabla 29 donde se encuentra que los valores al estar por debajo de los 30mm la permeabilidad es baja para los especímenes, presentándose –igual que con el coeficiente de permeabilidad al agua- una disminución de la permeabilidad a medida que se adiciona una mayor cantidad de metacaolín al concreto.

Al tenerse dos determinaciones diferentes para la prueba en los cilindros se debe tomar como conclusión final una permeabilidad media, ya que esta permite evaluar el concreto en un espacio más abierto, obligándose a utilizar factores de seguridad mayores para protegerse del paso del agua.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## 6. REFLEXIÓN

Con el trabajo realizado deja un sentimiento de satisfacción, si bien no se obtuvieron los resultados esperados en cuanto a las resistencias a la compresión y a la flexión, el tiempo utilizado para la realización del proyecto fue completo, además se pudo realizar la mayoría de los ensayos permitiendo la consecución de un aprendizaje didáctico.

Fue un proceso de ensayo error, en donde se intentaron explicar de la manera más objetiva las causas de error en los resultados, lo que requirió un gran esfuerzo para investigar y entender lo que se esperaba, permitiendo aprender a analizar y solucionar problemas ágilmente, lo cual es fundamental dentro de la profesión de Ingeniería Civil.

Para un futuro quedan enseñanzas como:

- La implementación de otro aditivo para trabajar con el metacaolín.
- Trabajar con los equipos adecuados para una homogenización correcta de las mezclas.
- Considerar un porcentaje de desperdicios mayor para los ensayos de laboratorio.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Academia. (s.f.). *Resistencia a la Abrasión*. Recuperado el Octubre de 2015, de [http://www.academia.edu/8844892/ABRASI%C3%93N\\_Se\\_define\\_a](http://www.academia.edu/8844892/ABRASI%C3%93N_Se_define_a)
- ACI. (2006). *350-06: Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures*. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute.
- Aguilera, G. (s.f.). *Especificaciones de producto FORTACRET 10*. Insumo industrial CORONA. Recuperado el Noviembre de 2015
- Aguirre, A., & Mejía de Gutierrez, R. (2013). Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. En *Materiales de la construcción* (págs. 7-38). Recuperado el Septiembre de 2014
- ASTM international. (2012). *Standard test method for abrasion resistance of concrete (Undercater method)*. Norma, United State. Recuperado el Noviembre de 2015
- ASTM international. (2014). *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*. Norma. Recuperado el Noviembre de 2015
- Banco de la República. (Octubre de 2000). *Banco de la Republica- Actividad cultural*. Recuperado el Septiembre de 2014, de Materiales de construcción: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/matcon/matcon9.htm>
- Baroni, M., & Eros, Z. (2005). *Silicato*. Recuperado el Septiembre de 2014, de WordReferencia: <http://www.wordreference.com/definicion/silicato>
- Concreto, I. (2015). Densidades material de Industrial Concreto [Grabado por L. Lopera]. Medellín. Recuperado el Agosto de 2015
- CORONA. (2015). *Fortacret 10 de Corona y la clasificación y uso de las puzolanas para los concretos*. Recuperado el Noviembre de 2015
- CORONA. (Enero de 2015). *FORTACRET de Corona*. Presentación. Recuperado el Noviembre de 2015
- CORONA. (2015). *Recomendaciones para la especificación de Fortacret*. CORONA. Recuperado el Octubre de 2015
- Euclid Chemical TOXEMENT. (2009). *PLastol HR-DF*. Ficha tecnica, Bogotá D.C. Recuperado el Octubre de 2015
- Holcim México. (s.f.). *Holcim*. Recuperado el 2015, de Concreto: <http://www.holcim.com.mx/productos-y-servicios/concreto.html>
- La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

instituto Colombiano de normas Técnicas y Certificación, INCONTEC. (1998). *Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua*. Bogotá D.C: INCONTEC. Recuperado el Noviembre de 2015

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC. (1999). *Método de ensayo para determinar el esfuerzo a la flexión del concreto (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios)*. Bogotá D.C: INCONTEC. Recuperado el Noviembre de 2015

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, INCONTEC. (2012). *Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Bogotá D.C: INCONTEC. Recuperado el Noviembre de 2015

McCarthy, M., & Nasir, N. (2014). Effect of metakaolin on early strength of GGBS ternary concrete. En *4th international conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials* (págs. 584-586). Haikou. Recuperado el Agosto de 2014

Ministerio de ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sísmo resistente*. Norma, Bogotá D.C. Recuperado el Noviembre de 2015

National Ready Mixed Concrete Association. (1998). *¿Qué, por qué y cómo? Resistencia a la flexión*. Recuperado el Octubre de 2015

Olvera Venegas, P. N., & Hernández Cruz, L. E. (2013). *Unuversidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Recuperado el 2015, de El caolín y sus aplicaciones industriales: <http://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n2/e1.html>

Osorio, J. D. (07 de Septiembre de 2010). *Blog 360 en concreto*. Recuperado el Septiembre de 2015, de Historia del concreto y del cemento: <http://blog.360gradosenconcreto.com/historia-del-concreto/>

Presidencia de la República de Colombia. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sísmo Resistente NSR-10*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

QuimiNet, U. (04 de Enero de 2005). *¿Que es el caolín?* Recuperado el Septiembre de 2014, de QuimNet: <http://www.wuiminet.com/articulos/que-es-el-caolin-4174.htm>

Rafit Abbas, S. A.-E.-E.-S. (2010). *Propiedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: Mortero y hormigón*. Recuperado el Octubre de 2015

Restrepo Gutiérrez, J. C., Restrepo Baena, O. J., & Tobón, J. I. (2006). *Efectos de la adición de metacaolín en el cemento portland*. Universidad Nacional de Colombia, Antioquia, Medellín. Recuperado el Octubre de 2015

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



- Rivera L., G. A. (s.f.). Dosificación de mezclas de concreto. En G. A. Rivera L., *Concreto simple* (págs. 168-198). Facultad de ingeniería civil - Universidad del Cauca. Recuperado el Noviembre de 2015
- Santalla , L. (15 de Mayo de 2012). *Teoria de construcción*. Recuperado el Febrero de 2015, de Matacaolín: definición y ensayos: [teoriadeconstruccion.net/blog/metacaolin-definicion-y-ensayos/](http://teoriadeconstruccion.net/blog/metacaolin-definicion-y-ensayos/)
- Stulz, R., & Mukerji, K. (1993). *Materiales de construcción apropiados*. Switzerland: IT Publications. Recuperado el Noviembre de 2015, de <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms09.htm>
- Torres Castellano, N., Izquierdo García , S., Torres Agredo, J., & Mejía Gutiérrez , R. (2014). *Resistencia a la penetración del ion cloruro y a la carbonatación de concretos adicionados con un residuo de la industria petroquímica*. Recuperado el Agosto de 2015
- TOXEMENT. (2009). *Plastol HR-DF*. Bogotá. Recuperado el Noviembre de 2015
- TOXEMENT. (2013). *Plastol HR-DM*. Hoja tecnica , Bogota. Recuperado el Noviembre de 2015
- Zeng, J., Fan, Z., & Chen, L. (2014). Influence of matakaolin on strength and microstructure of steam-cured high-strength concrete. En *2nd global Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering* (págs. 838-841). China. Recuperado el Agosto de 2014

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## ANEXOS

### Anexo 1: Cantidades de material utilizadas por mezcla

La Tabla 30, Tabla 31, Tabla 32, Tabla 33 y Tabla 34 muestran las diferentes cantidades de mezclas que se usaron según el diseño de mezclas original con la corrección por humedad tanto en arena como en triturado, la cantidad de mezcla que se realizó, el para que se utilizó y el asentamiento que se obtuvo para cada proceso.

Tabla 30: Mezclas patrón para cilindros, vigas y tortas para abrasión

| MEZCLA PATRON            |            |                          |            |                          |            |
|--------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
| CILINDROS                |            | VIGAS                    |            | TORTAS ABRASIÓN          |            |
| Fecha mezclado           | 05/08/2015 | Fecha mezclado           | 12/08/2015 | Fecha mezclado           | 23/09/2015 |
| Cantidad mezcla (L)      | 64         | Cantidad mezcla (L)      | 71         | Cantidad mezcla (L)      | 24         |
| Cantidad material a usar |            | Cantidad material a usar |            | Cantidad material a usar |            |
| Cemento (Kg)             | 24.32      | Cemento (Kg)             | 26.98      | Cemento (Kg)             | 9.12       |
| Metacaolin (Kg)          | 0          | Metacaolin (Kg)          | 0          | Metacaolin (Kg)          | 0          |
| Agua (L)                 | 11.53      | Agua (L)                 | 11.35      | Agua (L)                 | 3.87       |
| Arena (Kg)               | 57.28      | Arena (Kg)               | 65.32      | Arena (Kg)               | 21.9       |
| Triturado (Kg)           | 63.81      | Triturado (Kg)           | 70.45      | Triturado (Kg)           | 23.96      |
| Aditivo (g)              | 291.84     | Aditivo (g)              | 323.76     | Aditivo (g)              | 109.44     |
| Asentamiento (cm)        | 18         | Asentamiento (cm)        | 18         | Asentamiento (cm)        | 23         |

Tabla 31: Mezclas 5MK para cilindros, vigas y tortas de abrasión

| MEZCLA 5MK               |            |                          |            |                          |            |
|--------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
| CILINDROS                |            | VIGAS                    |            | TORTAS ABRASIÓN          |            |
| Fecha mezclado           | 12/08/2015 | Fecha mezclado           | 14/08/2015 | Fecha mezclado           | 25/09/2015 |
| Cantidad mezcla (L)      | 64         | Cantidad mezcla (L)      | 73         | Cantidad mezcla (L)      | 27         |
| Cantidad material a usar |            | Cantidad material a usar |            | Cantidad material a usar |            |
| Cemento (Kg)             | 23.1       | Cemento (Kg)             | 26.35      | Cemento (Kg)             | 9.75       |
| Metacaolin (Kg)          | 1.22       | Metacaolin (Kg)          | 1.39       | Metacaolin (Kg)          | 0.51       |
| Agua (L)                 | 11.43      | Agua (L)                 | 11.34      | Agua (L)                 | 3.89       |
| Arena (Kg)               | 57.86      | Arena (Kg)               | 67.71      | Arena (Kg)               | 25.31      |
| Triturado (Kg)           | 64.42      | Triturado (Kg)           | 73.47      | Triturado (Kg)           | 27.21      |
| Aditivo (g)              | 291.84     | Aditivo (g)              | 332.88     | Aditivo (g)              | 123.12     |
| Asentamiento (cm)        | 5          | Asentamiento (cm)        | 14         | Asentamiento (cm)        | 23         |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 32: Mezclas 10MK para cilindros, vigas y tortas para abrasión

| MEZCLA 10MK              |                   |                          |                   |                          |                   |
|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| CILINDROS                |                   | VIGAS                    |                   | TORTAS ABRASIÓN          |                   |
| Fecha mezclado           | <b>14/08/2015</b> | Fecha mezclado           | <b>25/08/2015</b> | Fecha mezclado           | <b>28/09/2015</b> |
| Cantidad mezcla (L)      | <b>64</b>         | Cantidad mezcla (L)      | <b>76</b>         | Cantidad mezcla (L)      | <b>27</b>         |
| Cantidad material a usar |                   | Cantidad material a usar |                   | Cantidad material a usar |                   |
| Cemento (Kg)             | 21.89             | Cemento (Kg)             | 26                | Cemento (Kg)             | 9.23              |
| Metacaolin (Kg)          | 2.43              | Metacaolin (Kg)          | 2.89              | Metacaolin (Kg)          | 1.03              |
| Agua (L)                 | 9.91              | Agua (L)                 | 9.62              | Agua (L)                 | 3.4               |
| Arena (Kg)               | 59.54             | Arena (Kg)               | 73.23             | Arena (Kg)               | 26.02             |
| Triturado (Kg)           | 65.36             | Triturado (Kg)           | 77.24             | Triturado (Kg)           | 27.45             |
| Aditivo (g)              | 291.84            | Aditivo (g)              | 345.56            | Aditivo (g)              | 123.12            |
| Asentamiento (cm)        | <b>8</b>          | Asentamiento (cm)        | <b>21</b>         | Asentamiento (cm)        | <b>19</b>         |

Tabla 33: Mezclas 15MK para cilindros, vigas y tortas para abrasión

| MEZCLA 15MK              |                   |                          |                   |                          |                   |
|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| CILINDROS                |                   | VIGAS                    |                   | TORTAS ABRASIÓN          |                   |
| Fecha mezclado           | <b>25/08/2015</b> | Fecha mezclado           | <b>26/08/2015</b> | Fecha mezclado           | <b>25/08/2015</b> |
| Cantidad mezcla (L)      | <b>88</b>         | Cantidad mezcla (L)      | <b>77</b>         | Cantidad mezcla (L)      | <b>88</b>         |
| Cantidad material a usar |                   | Cantidad material a usar |                   | Cantidad material a usar |                   |
| Cemento (Kg)             | 28.42             | Cemento (Kg)             | 24.87             | Cemento (Kg)             | 28.42             |
| Metacaolin (Kg)          | 5.02              | Metacaolin (Kg)          | 4.39              | Metacaolin (Kg)          | 5.02              |
| Agua (L)                 | 9.95              | Agua (L)                 | 10.05             | Agua (L)                 | 9.95              |
| Arena (Kg)               | 86.03             | Arena (Kg)               | 73.69             | Arena (Kg)               | 86.03             |
| Triturado (Kg)           | 90.9              | Triturado (Kg)           | 79.77             | Triturado (Kg)           | 90.9              |
| Aditivo (g)              | 401.28            | Aditivo (g)              | 351.12            | Aditivo (g)              | 401.28            |
| Asentamiento (cm)        | <b>9</b>          | Asentamiento (cm)        | <b>7</b>          | Asentamiento (cm)        | <b>9</b>          |

Tabla 34: Mezclas 20MK para cilindros, vigas y tortas para abrasión

| MEZCLA 20MK              |                   |                          |                   |                          |                   |
|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| CILINDROS                |                   | VIGAS                    |                   | TORTAS ABRASIÓN          |                   |
| Fecha mezclado           | <b>26/08/2015</b> | Fecha mezclado           | <b>01/09/2015</b> | Fecha mezclado           | <b>26/08/2015</b> |
| Cantidad mezcla (L)      | <b>88</b>         | Cantidad mezcla (L)      | <b>77</b>         | Cantidad mezcla (L)      | <b>88</b>         |
| Cantidad material a usar |                   | Cantidad material a usar |                   | Cantidad material a usar |                   |
| Cemento (Kg)             | 26.75             | Cemento (Kg)             | 23.41             | Cemento (Kg)             | 26.75             |
| Metacaolin (Kg)          | 6.69              | Metacaolin (Kg)          | 5.85              | Metacaolin (Kg)          | 6.69              |
| Agua (L)                 | 10.18             | Agua (L)                 | 12.33             | Agua (L)                 | 10.18             |
| Arena (Kg)               | 85.84             | Arena (Kg)               | 73.16             | Arena (Kg)               | 85.84             |
| Triturado (Kg)           | 92.36             | Triturado (Kg)           | 79.35             | Triturado (Kg)           | 92.36             |
| Aditivo (g)              | 401.36            | Aditivo (g)              | 351.12            | Aditivo (g)              | 401.36            |
| Asentamiento (cm)        | <b>9</b>          | Asentamiento (cm)        | <b>12</b>         | Asentamiento (cm)        | <b>9</b>          |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## Anexo 2: Ficha técnica FORTACRET 10 de Corona

Referencia: (Aguilera)

INSUMOS INDUSTRIALES  
**corona**



SC 352-2

SA 040-1

### ESPECIFICACIONES DE PRODUCTO **FORTACRET 10™** MATERIAL DE ALTA REACTIVIDAD PUZOLÁNICA

El FORTACRET es una puzolana de alta calidad, finamente molida, obtenida a partir de materias primas naturales y procesos industriales controlados. El uso de este material permite obtener las siguientes ventajas, cuando es utilizado como reemplazo parcial y adición en mezclas base cemento: Desarrolla mayor resistencia a la compresión, disminuye el calor de hidratación en vaciados masivos, disminuye la reacción álcali-agregado, disminuye los daños por ataques de sulfatos y cloruros, otorga mayor durabilidad de concretos al desarrollar matrices de hormigón más densas y compactas y, por tanto, menos porosas, disminuye considerablemente la permeabilidad ayudando a controlar las eflorescencias, reduce la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, y aumenta la resistencia a ciclos de hielo/deshielo.

|  |   |   |   |
|--|---|---|---|
| Vigente desde  | 2013 / 03 / 01  | Versión No  | 4 |
| FECHA  | Diciembre 12 de 2014  |   |   |
| REFERENCIA   | FORTACRET 10  |   |   |
| PRESENTACIÓN   | Polvo fino, empacado a granel en big-bag o bultos de 25 Kg. |   |   |
| CARACTERÍSTICAS FÍSICAS  |   |   |   |
|  | Norma ASTM C618-13  | Rango de especificaciones                         |   |
| Dv <sub>10</sub> μm  | N.A.  | 1,5 - 2,5 μm <sup>(1)</sup>                       |   |
| Dv <sub>50</sub> μm  | N.A.  | 9,0 - 12,0 μm <sup>(1)</sup>                      |   |
| Dv <sub>90</sub> μm  | N.A.  | 34,5 - 39,5 μm <sup>(1)</sup>                     |   |
| Retenido Sobre Malla U.S. Standard No 325  | < 34%   | < 3,0%  |   |
| Área Superficial Especifica Blaine (NTC-33)  | N.A.  | 20.000 - 24.000 cm <sup>2</sup> /g <sup>(1)</sup> |   |
| Gravedad Especifica  | N.A.  | 2,45 - 2,65 <sup>(1)</sup>                        |   |
| Humedad  | N.A.  | <3,0 % <sup>(1)</sup>                             |   |
| Color  | N.A.  | Gris / Gris Claro                                 |   |
| PROPIEDADES QUÍMICAS   |   |   |   |
| % SiO <sub>2</sub>   | N.A.  | 55,0 - 65,0 % <sup>(1)</sup>                      |   |
| % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | N.A.  | 26,5 - 37,5 % <sup>(1)</sup>                      |   |
| % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | N.A.  | < 5,0 % <sup>(1)</sup>                            |   |
| % SiO <sub>2</sub> + % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | > 70 %  | > 85,00 %   |   |
| Pérdidas por Ignición, PPI a 800 °C  | < 10 %  | < 2,5 %   |   |
| % SO <sub>3</sub>  | < 4,0 %   | < 0,50 %  |   |
| PROPIEDADES DE DESEMPEÑO   |   |   |   |
| SAI a los 28 días (Strenght Activity Index)*   | > 75 %  | > 110 %   |   |
| Reactividad Pozolánica Según prueba de Chapelle modificada**                             | N.A.  | >1.300 mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g                  |   |

<sup>(1)</sup> Requisito no exigido por la norma ASTM C618; corresponde a requerimientos adicionales e internos de calidad

\* ASTM C 109M-2002: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Mortars, measured on Standard Early High Strength Cement.

\*\* Chapelle Test: Measuring the total quantity of fixed calcium hydroxide (Chapelle Test Modified) referido a la norma francesa NF P 18-513, Annexe A.

Elaborado por: GABRIEL AGUILERA  
Ingeniero de Investigación & Desarrollo

El FORTACRET 10™ de Corona® está garantizado como producto de acuerdo con los datos de su ficha técnica. Es responsabilidad del usuario, especificador, diseñador y ejecutor de las mezclas que lo incorporen determinar la dosificación, uso y desempeño para un uso general o específico. Por tanto, Corona S.A. sus filiales o subsidiarias no asumen ninguna responsabilidad directa, indirecta o emergente que pudiera resultar de la determinación de uso que haga el comprador.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

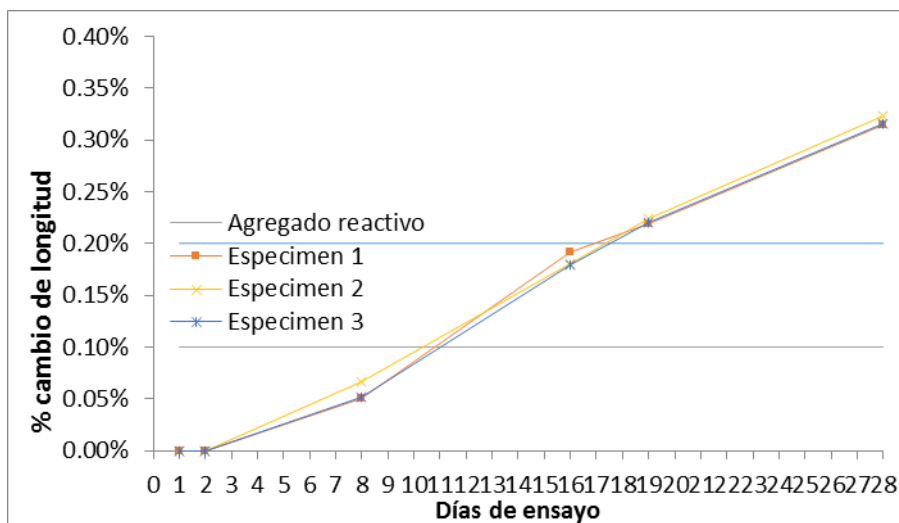
### Anexo 3: Resultados completos ensayo de reacción álcali agregado (RAS)

A continuación se muestran los datos completos obtenidos durante la realización del ensayo, las medidas realizadas para cada uno de los tres especímenes, y las gráficas con los 3 (o 2 –permitido por norma) resultados obtenidos de forma independiente.

Ensayo para mezcla Patrón

Tabla 35: Resultados con mezcla Patrón

| Lectura                          | Comparativa inicial (Lc) | Lo         | L1         | L2         | L3         | L4         |
|----------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Temperatura del laboratorio (°C) | 22                       | 23         | 23         | 22         |            |            |
| Fecha:                           | 10/09/2015               | 11/09/2015 | 17/09/2015 | 25/09/2015 | 28/09/2015 | 07/10/2015 |
| Días de ensayo                   | 1                        | 2          | 8          | 16         | 19         | 28         |
| Especímen 1                      | -1.896                   | -1.76      | -1.634     | -1.282     | -1.214     | -0.974     |
| Especímen 2                      | -0.910                   | -1.61      | -1.444     | -1.158     | -1.05      | -0.802     |
| Especímen 3                      | -2.080                   | -1.928     | -1.798     | -1.48      | -1.378     | -1.140     |
| $\Delta$ long Especimen 1        |                          |            | -0.126     | -0.478     | -0.546     | -0.786     |
| $\Delta$ long Especimen 2        |                          |            | -0.166     | -0.452     | -0.560     | -0.808     |
| $\Delta$ long Especimen 3        |                          |            | -0.130     | -0.448     | -0.550     | -0.788     |
| % cambio de long Esp 1           | 0                        | 0%         | 0.050%     | 0.191%     | 0.218%     | 0.314%     |
| % cambio de long Esp 2           | 0                        | 0%         | 0.066%     | 0.181%     | 0.224%     | 0.323%     |
| % cambio de long Esp 3           | 0                        | 0%         | 0.052%     | 0.179%     | 0.220%     | 0.315%     |
| Promedio de la muestra           | 0%                       | 0%         | 0.06%      | 0.18%      | 0.22%      | 0.32%      |
| Desviación estandar              | 0                        | 0          | 8.8121E-05 | 6.5156E-05 | 2.8844E-05 | 4.8662E-05 |



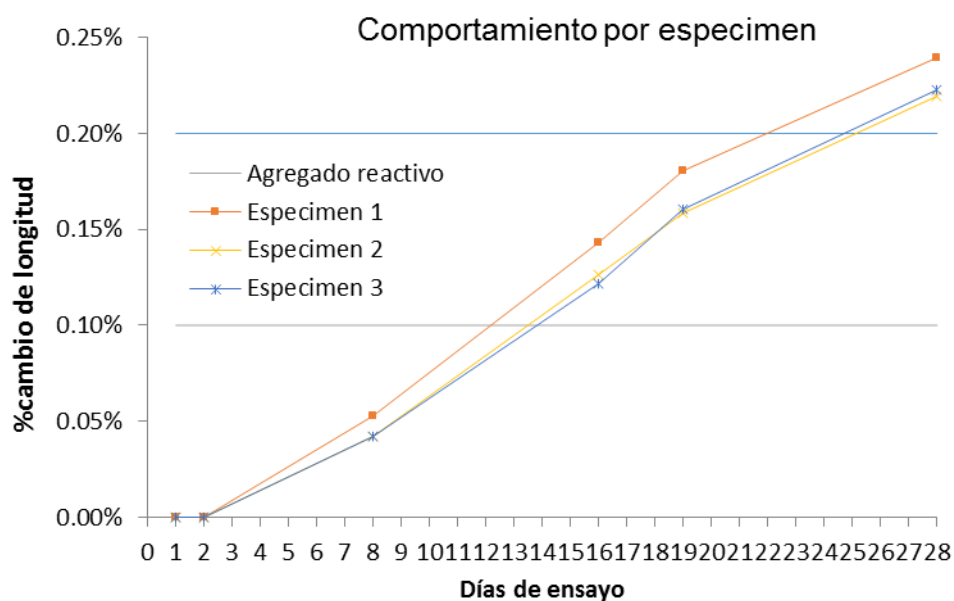
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Gráfica 18: Resultados independientes de mezcla patrón

Ensayo con reemplazo del 5% de Metacaolín

Tabla 36: Resultados con reemplazo del 5% de metacaolín

| Lectura                          | Comparativa inicial (Lc) | Lo         | L1         | L2         | L3         | L4         |
|----------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Temperatura del laboratorio (°C) | 22                       | 23         | 23         | 22         | 24         | 22         |
| Fecha:                           | 10/09/2015               | 11/09/2015 | 17/09/2015 | 25/09/2015 | 28/09/2015 | 07/10/2015 |
| Días de ensayo                   | 1                        | 2          | 8          | 16         | 19         | 28         |
| Especímen 1                      | -1.990                   | -1.818     | -1.686     | -1.46      | -1.366     | -1.22      |
| Especímen 2                      | -1.634                   | -1.456     | -1.350     | -1.14      | -1.06      | -0.908     |
| Especímen 3                      | -1.200                   | -1.030     | -0.924     | -0.726     | -0.628     | -0.474     |
| $\Delta$ long Especimen 1        |                          |            | -0.132     | -0.358     | -0.452     | -0.598     |
| $\Delta$ long Especimen 2        |                          |            | -0.106     | -0.316     | -0.396     | -0.548     |
| $\Delta$ long Especimen 3        |                          |            | -0.106     | -0.304     | -0.402     | -0.556     |
| % cambio de long Esp 1           | 0                        | 0%         | 0.053%     | 0.143%     | 0.181%     | 0.239%     |
| % cambio de long Esp 2           | 0                        | 0%         | 0.042%     | 0.126%     | 0.158%     | 0.219%     |
| % cambio de long Esp 3           | 0                        | 0%         | 0.042%     | 0.122%     | 0.161%     | 0.222%     |
| Promedio de la muestra           | 0%                       | 0%         | 0.05%      | 0.13%      | 0.17%      | 0.23%      |
| Desviación estandar              | 0.00%                    | 0.00%      | 0.01%      | 0.01%      | 0.01%      | 0.01%      |



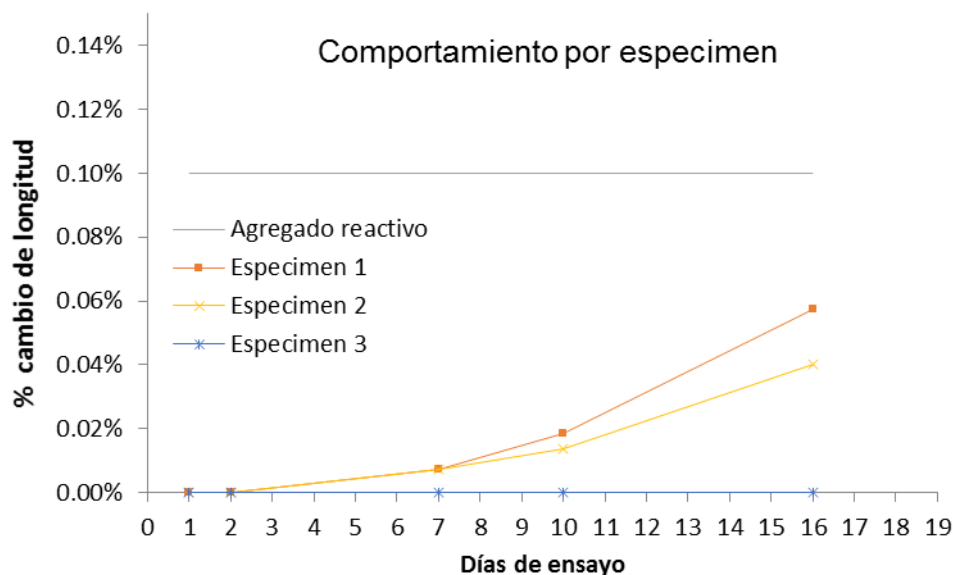
Gráfica 19: Resultados independientes con reemplazo de 5% de metacaolín

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## Ensayo con reemplazo del 5% de Metacaolín

Tabla 37: Resultados con reemplazo del 10% de metacaolín

| Lectura                          | Comparativa inicial (Lc) | Lo         | L1         | L2         | L3         |
|----------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Temperatura del laboratorio (°C) | 25                       | 23         | 24         | 25         |            |
| Fecha:                           | 13/01/2016               | 14/01/2016 | 19/01/2016 | 22/01/2016 | 28/01/2016 |
| Días de ensayo                   | 1                        | 2          | 7          | 10         | 16         |
| Especímen 1                      | -1.934                   | -1.764     | -1.746     | -1.718     | -1.620     |
| Especímen 2                      | -1.638                   | -1.46      | -1.442     | -1.426     | -1.36      |
| Especímen 3                      |                          |            |            |            |            |
| $\Delta$ long Especimen 1        |                          |            | -0.018     | -0.046     | -0.144     |
| $\Delta$ long Especimen 2        |                          |            | -0.018     | -0.034     | -0.100     |
| $\Delta$ long Especimen 3        |                          |            | 0.000      | 0.000      | 0.000      |
| % cambio de long Esp 1           | 0                        | 0%         | 0.007%     | 0.018%     | 0.058%     |
| % cambio de long Esp 2           | 0                        | 0%         | 0.007%     | 0.014%     | 0.040%     |
| % cambio de long Esp 3           | 0                        | 0%         | 0.000%     | 0.000%     | 0.000%     |
| Promedio de la muestra           | 0%                       | 0%         | 0.00%      | 0.01%      | 0.03%      |
| Desviación estandar              | 0.00%                    | 0.00%      | 0.00%      | 0.00%      | 0.03%      |



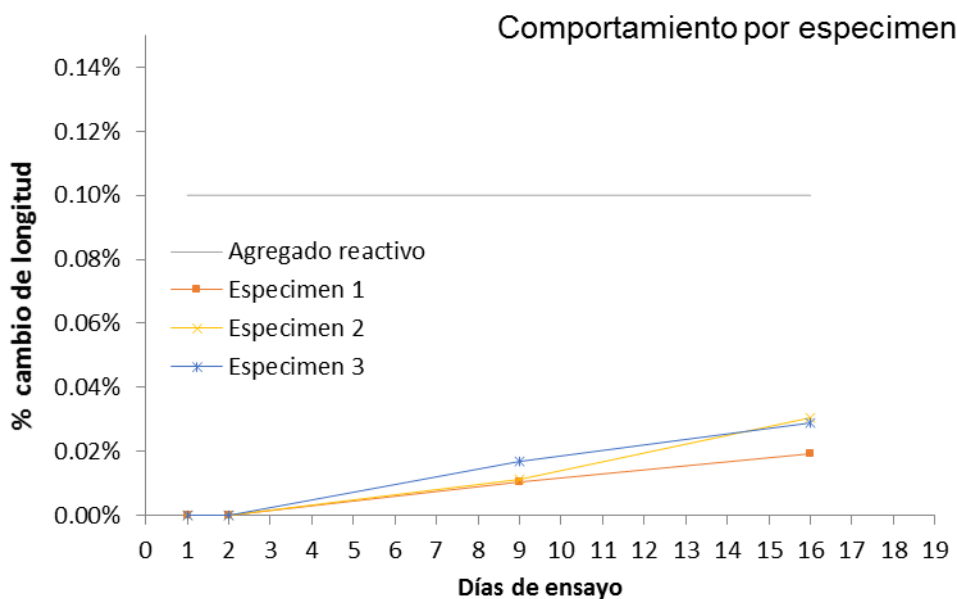
Gráfica 20: Resultados independientes con reemplazo de 10% de metacaolín

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## Ensayo con reemplazo del 15% de Metacaolín

Tabla 38: Resultados con reemplazo de 15% de metacaolín

| Lectura                          | Comparativa inicial (Lc) | Lo         | L1         | L2         | L3     | L4     | L5     | L6     |
|----------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| Temperatura del laboratorio (°C) | 25                       | 23         | 26         | 24         |        |        |        |        |
| Fecha:                           | 24/09/2015               | 25/09/2015 | 02/10/2015 | 09/10/2015 |        |        |        |        |
| Días de ensayo                   | 1                        | 2          | 9          | 16         |        |        |        |        |
| Especimen 1                      | -1.754                   | -1.258     | -1.232     | -1.21      |        |        |        |        |
| Especimen 2                      | -1.986                   | -1.836     | -1.808     | -1.76      |        |        |        |        |
| Especimen 3                      | -1.970                   | -1.770     | -1.728     | -1.698     |        |        |        |        |
| Δlong Especimen 1                |                          |            | -0.026     | -0.048     | -1.258 | -1.258 | -1.258 | -1.258 |
| Δlong Especimen 2                |                          |            | -0.028     | -0.076     | -1.836 | -1.836 | -1.836 | -1.836 |
| Δlong Especimen 3                |                          |            | -0.042     | -0.072     | -1.770 | -1.770 | -1.770 | -1.770 |
| % cambio de long Esp 1           | 0                        | 0%         | 0.010%     | 0.019%     | 0.503% | 0.503% | 0.503% | 0.503% |
| % cambio de long Esp 2           | 0                        | 0%         | 0.011%     | 0.030%     | 0.734% | 0.734% | 0.734% | 0.734% |
| % cambio de long Esp 3           | 0                        | 0%         | 0.017%     | 0.029%     | 0.708% | 0.708% | 0.708% | 0.708% |
| Promedio de la muestra           | 0%                       | 0%         | 0.01%      | 0.03%      | 0.65%  | 0.65%  | 0.65%  | 0.65%  |
| Desviación estandar              | 0.00%                    | 0.00%      | 0.00%      | 0.01%      | 0.13%  | 0.13%  | 0.13%  | 0.13%  |



Gráfica 21: Resultados independientes con reemplazo de 15% de metacaolín

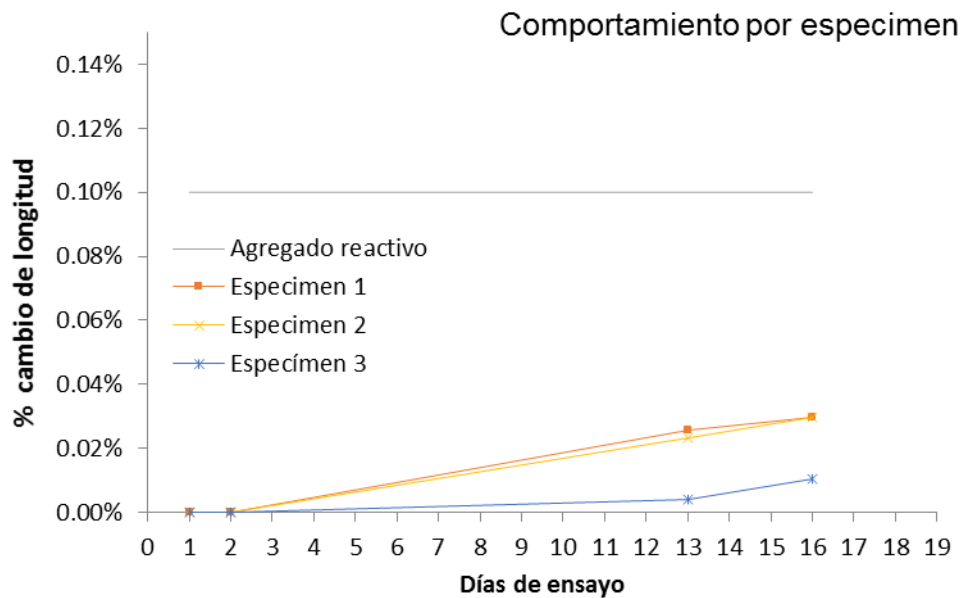
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



## Ensayo con reemplazo del 20% de Metacaolín

Tabla 39: Resultados con reemplazo de 20% de metacaolín

| Lectura                          | Comparativa inicial (Lc) | Lo         | L1         | L2         | L3     | L4     | L5     | L6     |
|----------------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| Temperatura del laboratorio (°C) | 23                       | 22         | 22         | 24         |        |        |        |        |
| Fecha:                           | 08/10/2015               | 09/10/2015 | 20/10/2015 | 23/10/2015 |        |        |        |        |
| Días de ensayo                   | 1                        | 2          | 13         | 16         |        |        |        |        |
| Especimen 1                      | -1.680                   | -1.548     | -1.484     | -1.474     |        |        |        |        |
| Especimen 2                      | -1.558                   | -1.432     | -1.374     | -1.358     |        |        |        |        |
| Especimen 3                      | -2.080                   | -2.090     | -2.080     | -2.064     |        |        |        |        |
| $\Delta$ long Especimen 1        |                          |            | -0.064     | -0.074     | -1.548 | -1.548 | -1.548 | -1.548 |
| $\Delta$ long Especimen 2        |                          |            | -0.058     | -0.074     | -1.432 | -1.432 | -1.432 | -1.432 |
| $\Delta$ long Especimen 3        |                          |            | -0.010     | -0.026     | -2.090 | -2.090 | -2.090 | -2.090 |
| % cambio de long Esp 1           | 0                        | 0%         | 0.026%     | 0.030%     | 0.619% | 0.619% | 0.619% | 0.619% |
| % cambio de long Esp 2           | 0                        | 0%         | 0.023%     | 0.030%     | 0.573% | 0.573% | 0.573% | 0.573% |
| % cambio de long Esp 3           | 0                        | 0%         | 0.004%     | 0.010%     | 0.836% | 0.836% | 0.836% | 0.836% |
| Promedio de la muestra           | 0%                       | 0%         | 0.02%      | 0.02%      | 0.68%  | 0.68%  | 0.68%  | 0.68%  |
| Desviación estandar              | 0.00%                    | 0.00%      | 0.01%      | 0.01%      | 0.14%  | 0.14%  | 0.14%  | 0.14%  |



Gráfica 22: Resultados independientes con reemplazo de 20% de metacaolín

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

#### **Anexo 4: Resultados ensayo Modulo de Rotura a los 56 días y 90 días**

Muestra: Patrón

Fecha de muestreo:

- 56 días de curado: 12 de octubre de 2015
- 90 días de curado: 10 de noviembre de 2015

Asentamiento: 180 mm

Resultados: Tabla 40

Tabla 40: Resultados mezcla patrón - Modulo de rotura

| Edad | F. Ensayo   | Largo<br>(mm) | Ancho<br>(mm) | Alto<br>(mm) | Carga<br>(kN) | kg/cm <sup>2</sup> | psi | MPa  | %   | Prensa                |
|------|-------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------------|-----|------|-----|-----------------------|
| 56   | 07-Oct-2015 | 501           | 152           | 151          | 36.190        | 48.0               | 686 | 4.71 | 120 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 07-Oct-2015 | 502           | 152           | 151          | 35.110        | 46.6               | 666 | 4.57 | 116 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 07-Oct-2015 | 501           | 151           | 150          | 35.300        | 47.6               | 680 | 4.66 | 119 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 10-Nov-2015 | 502           | 153           | 151          | 39.620        | 52.0               | 743 | 5.10 | 130 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 10-Nov-2015 | 502           | 153           | 151          | 36.480        | 48.1               | 687 | 4.71 | 120 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 10-Nov-2015 | 502           | 152           | 151          | 35.790        | 47.3               | 676 | 4.63 | 118 | 02 CT 300 Prensa viga |

Muestra: 5 MK

Fecha de muestreo:

- 56 días de curado: 09 de octubre de 2015
- 90 días de curado: 12 de noviembre de 2015

Asentamiento: 140 mm

Resultados: Tabla 41

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 41: Resultados mezcla con adición de 5 MK - Modulo de rotura

| Edad | F. Ensayo   | Largo<br>(mm) | Ancho<br>(mm) | Alto<br>(mm) | Carga<br>(kN) | kg/cm <sup>2</sup> | psi | MPa  | %   | Prensa                |
|------|-------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------------|-----|------|-----|-----------------------|
| 56   | 09-Oct-2015 | 502           | 152           | 153          | 35.790        | 46.2               | 659 | 4.52 | 115 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 09-Oct-2015 | 502           | 152           | 153          | 39.620        | 51.2               | 731 | 5.02 | 128 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 09-Oct-2015 | 503           | 151           | 151          | 23.440        | 31.2               | 445 | 3.05 | 78  | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 12-Nov-2015 | 503           | 153           | 151          | 38.740        | 51.2               | 731 | 5.02 | 128 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 12-Nov-2015 | 503           | 155           | 151          | 41.480        | 53.7               | 768 | 5.27 | 134 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 12-Nov-2015 | 502           | 151           | 152          | 43.640        | 57.4               | 820 | 5.63 | 143 | 02 CT 300 Prensa viga |

Muestra: 10 MK

Fecha de muestreo:

- 56 días de curado: 20 de octubre de 2015
- 90 días de curado: 23 de noviembre de 2015

Asentamiento: 210 mm

Resultados: Tabla 42

Tabla 42: Resultados mezcla con adición de 10MK – Modulo de rotura

| Edad | F. Ensayo   | Largo<br>(mm) | Ancho<br>(mm) | Alto<br>(mm) | Carga<br>(kN) | kg/cm <sup>2</sup> | psi | MPa  | %   | Prensa                |
|------|-------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------------|-----|------|-----|-----------------------|
| 56   | 20-Oct-2015 | 501           | 152           | 152          | 33.930        | 44.4               | 635 | 4.35 | 111 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 20-Oct-2015 | 503           | 153           | 150          | 32.560        | 43.1               | 616 | 4.23 | 108 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 20-Oct-2015 | 502           | 151           | 152          | 33.240        | 43.8               | 626 | 4.29 | 110 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 23-Nov-2015 | 503           | 152           | 151          | 38.440        | 50.6               | 722 | 4.96 | 126 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 23-Nov-2015 | 503           | 153           | 154          | 34.030        | 43.1               | 616 | 4.23 | 108 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 23-Nov-2015 | 503           | 151           | 151          | 38.250        | 50.9               | 727 | 4.98 | 127 | 02 CT 300 Prensa viga |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Muestra: 15 MK

Fecha de muestreo:

- 56 días de curado: 21 de octubre de 2015
- 90 días de curado: 24 de noviembre de 2015

Asentamiento: 70 mm

Resultados: Tabla 43

Tabla 43: Resultados mezcla con adición de 15MK - Modulo de rotura

| Edad | F. Ensayo   | Largo<br>(mm) | Ancho<br>(mm) | Alto<br>(mm) | Carga<br>(kN) | kg/cm <sup>2</sup> | psi | MPa  | %   | Prensa                |
|------|-------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------------|-----|------|-----|-----------------------|
| 56   | 21-Oct-2015 | 502           | 155           | 152          | 44.230        | 56.6               | 808 | 5.54 | 141 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 21-Oct-2015 | 503           | 152           | 151          | 42.270        | 56.3               | 805 | 5.52 | 141 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 21-Oct-2015 | 503           | 153           | 150          | 46.090        | 61.0               | 872 | 5.98 | 153 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 24-Nov-2015 | 504           | 152           | 151          | 41.380        | 54.6               | 779 | 5.35 | 136 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 24-Nov-2015 | 503           | 154           | 152          | 45.990        | 59.2               | 846 | 5.80 | 148 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 24-Nov-2015 | 504           | 154           | 152          | 42.950        | 55.0               | 786 | 5.39 | 138 | 02 CT 300 Prensa viga |

Muestra: 20 MK

Fecha de muestreo:

- 56 días de curado: 27 de octubre de 2015
- 90 días de curado: 30 de noviembre de 2015

Asentamiento: 120 mm

Resultados: Tabla 44

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 44: Resultados mezcla con adición de 20MK - Modulo de rotura

| Edad | F. Ensayo   | Largo<br>(mm) | Ancho<br>(mm) | Alto<br>(mm) | Carga<br>(kN) | kg/cm <sup>2</sup> | psi | MPa  | %   | Prensa                |
|------|-------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------------|-----|------|-----|-----------------------|
| 56   | 27-Oct-2015 | 511           | 152           | 152          | 35.110        | 45.7               | 652 | 4.48 | 114 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 27-Oct-2015 | 502           | 152           | 151          | 11.380        | 15.0               | 214 | 1.47 | 37  | 02 CT 300 Prensa viga |
| 56   | 27-Oct-2015 | 502           | 152           | 152          | 33.150        | 43.4               | 620 | 4.25 | 109 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 30-Nov-2015 | 504           | 152           | 151          | 33.930        | 44.7               | 639 | 4.38 | 112 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 30-Nov-2015 | 503           | 151           | 152          | 35.890        | 46.9               | 670 | 4.60 | 117 | 02 CT 300 Prensa viga |
| 90   | 30-Nov-2015 | 503           | 152           | 152          | 34.520        | 45.4               | 649 | 4.45 | 114 | 02 CT 300 Prensa viga |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

## Anexo 5: Imágenes de ensayo de permeabilidad

Para cada una de las pruebas de permeabilidad se llevó un proceso de registro fotográfico que a continuación se presenta, cada mezcla realizada muestra de forma general la medida de columna de agua (las medidas se presentan en  $\text{cm}^3$ ) y de forma específica la medida de agua que penetra cada uno de los especímenes en cada mezcla.

Ver:

- Para mezcla patrón: Imagen 6 y Tabla 45
- Para mezcla con 5% de metacaolín: Imagen 7 y Tabla 46
- Para mezcla con 10% de metacaolín: Imagen 8 y Tabla 47
- Para mezcla con 15% de metacaolín: Imagen 9 y Tabla 48
- Para mezcla con 20% de metacaolín: Imagen 10 y Tabla 49

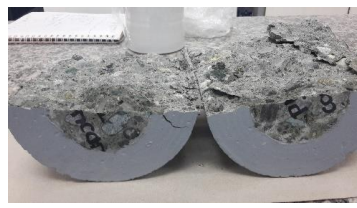


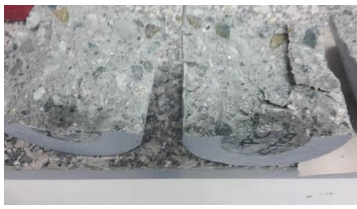


Mezcla patrón



Imagen 6: Medida columna de agua para mezcla patrón

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 45: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla patrón

| MEZCLA PATRÓN |  |   |
|---------------|--|---|
| Especimen 1   |   |   |
| Especimen 2   |   |   |
| Especimen 3   |  |  |

Mezcla con adición del 5% de metacaolín









Imagen 7: Medida columna de agua para mezcla con 5% de metacaolín

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Tabla 46: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla con adición de 5% de metacaolín

| MEZCLA CON 5% DE METACAOLIN |  |   |
|-----------------------------|--|---|
| Especimen 1                 |   |   |
| Especimen 2                 |   |   |
| Especimen 3                 |  |  |

Mezcla con adición del 10% de metacaolín

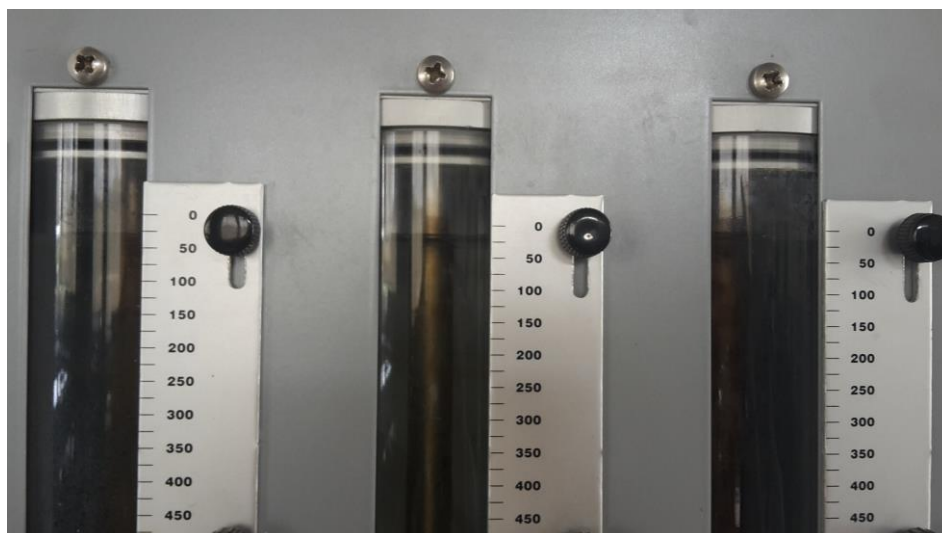


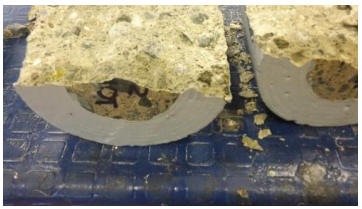


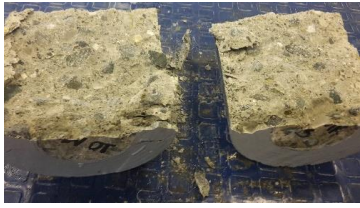


Imagen 8: Medida columna de agua para mezcla con 10% de metacaolín

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Tabla 47: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla con adición de 10% de metacaolín

| MEZCLA CON 10% DE METACAOLIN |  |   |
|------------------------------|--|---|
| Especimen 1                  |   |   |
| Especimen 2                  |   |   |
| Especimen 3                  |  |  |

Mezcla con adición del 15% de metacaolín

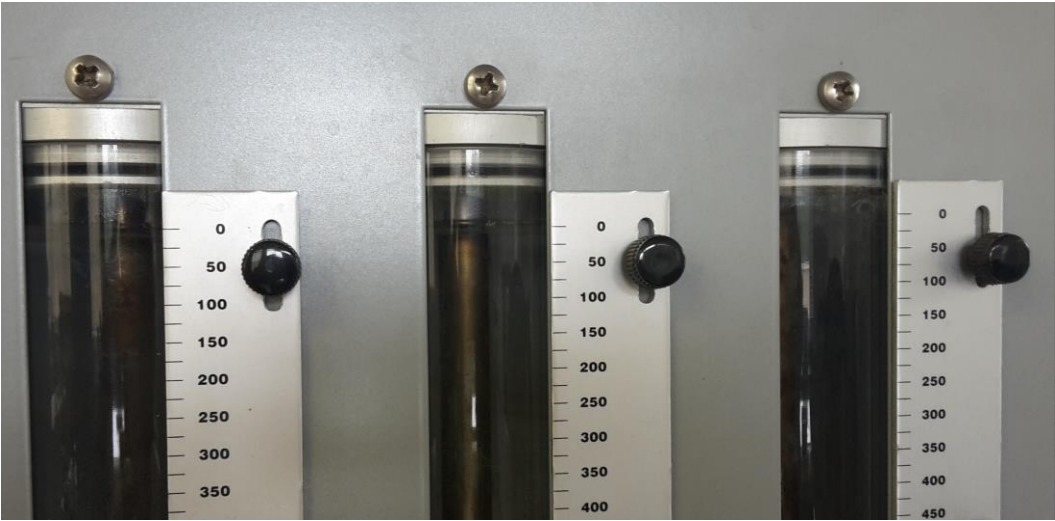


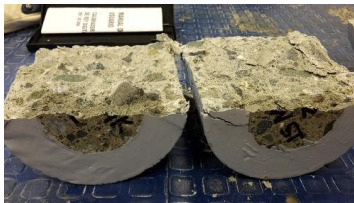





Imagen 9: Medida columna de agua para mezcla con 15% de metacaolín

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 48: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla con adición de 15% de metacaolín

| MEZCLA CON 15% DE METACOLIN |  |   |
|-----------------------------|--|---|
| Especimen 1                 |   |   |
| Especimen 2                 |   |   |
| Especimen 3                 |  |  |

Mezcla con adición del 20% de metacaolín

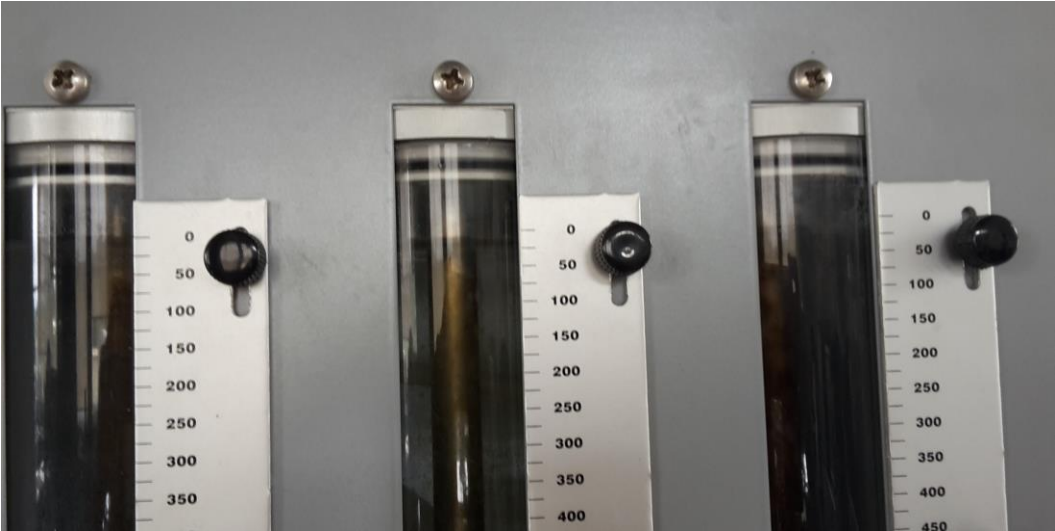








Imagen 10: Medida columna de agua para mezcla con 20% de metacaolín

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA

Tabla 49: Imágenes de ensayo de permeabilidad para mezcla con adición de 20% de metacaolín

| MEZCLA CON 20% DE METACOLIN |   |  |
|-----------------------------|---|--|
| Especimen 1                 |  |  |
| Especimen 2                 |  |  |
| Especimen 3                 |  |  |

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



## Anexo 6: Aditivo Plastol HR-DF

Referência: (TOXEMENT, 2009)



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: [atencioncliente@toxement.com.co](mailto:atencioncliente@toxement.com.co)  
[www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co)

### PLASTOL HR - DF

Aditivo reductor de agua retardante de alto rango para concreto

TX40T420

#### DESCRIPCION

PLASTOL HR - DF es un aditivo reductor de agua de alto rango, diseñado para producir concreto de alto desempeño, incrementando el asentamiento o reduciendo significativamente el agua y/o cemento.

PLASTOL HR - DF no contiene cloruros ni otros componentes que incrementen el potencial de corrosión en el concreto.

PLASTOL HR - DF es un aditivo de alto desempeño para construcciones de grandes estructuras de concreto.

PLASTOL HR - DF cumple o excede los requerimientos de:

ASTM C-494 aditivos químicos para concreto tipo D y G.  
ASTM C-1017 Especificaciones de aditivos químicos usados en la fabricación de concreto fluido.

#### INFORMACION TECNICA

Apariencia : Líquido de color café  
Densidad : 1.054 kg/l +/- 0.03 kg/l

#### USOS

PLASTOL HR - DF se utiliza principalmente en:

- Concreto con relación agua : cemento bajo.
- Concretos con agregados que generan mezclas ásperas y poco cohesivas.
- Concretos para estructuras hidráulicas, enterradas o en contacto permanente con agua.
- Concretos bombeables.
- Para lograr plasticidad en concretos para lanzado vía húmeda.
- En procesos constructivos como formaleas deslizando en donde se requiere alta manejabilidad y excelentes acabados.
- En general para todos los propósitos de un concreto premezclado.
- Concreto de alto desempeño.

#### VENTAJAS

- PLASTOL HR - DF provee una excelente manejabilidad.

- Permite el uso de un solo aditivo cuando se requiere reducción de agua, alta manejabilidad e inclusión de aire entre 3,5% y 6%.
- Genera reducciones de agua típicas para aditivos de alto rango: 5% a 25%.
- Provee una excelente manejabilidad.
- Reduce la permeabilidad del concreto.
- Ideal cuando se emplean arena de módulo de finura altos.
- Se puede trabajar como reductor de agua de alto poder, como aditivo de rango medio y como plastificante tipo G.
- Otorga a las mezclas excelentes resistencias mecánicas.

#### DOSEIFICACION

PLASTOL HR - DF puede ser usado del 0,2% al 1,2% del peso del cemento dependiendo del efecto deseado para el concreto.

Se recomienda hacer pruebas en obra para determinar la dosis óptima del aditivo.

#### APLICACION

PLASTOL HR - DF puede ser adicionado en la planta después que la mezcla de concreto ha sido humedecida o en la última porción del agua de amasado.

PLASTOL HR - DF puede ser adicionado en el sitio de trabajo para incrementar el asentamiento.

Debido a su química el PLASTOL HR - DF, genera retención de la trabajabilidad y acabados excelentes; características ideales en trabajos donde se requiere un terminado liso y donde se emplean agregados triturados.

No emplee PLASTOL HR - DF en combinación con aditivos base Naftaleno tales como el EUCON 37, EUCON 1037, EUCON MR 380, EUCON MR 370. Para mayor información consulte con el Departamento Técnico de EUCLID - TOXEMENT.

#### RECOMENDACIONES ESPECIALES

- No use PLASTOL HR - DF con aditivos base Naftaleno.
- Por sus características PLASTOL HR - DF puede generar retardos de fraguado en dosis superiores al 0,5% cuando se emplee en climas fríos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: [atencioncliente@toxement.com.co](mailto:atencioncliente@toxement.com.co)  
[www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co)

- Para el uso de dosis mayores consulte con el Departamento Técnico de EUCLID - TOXEMENT.
- Evite que el material se congele, en el caso de congelamiento agite muy bien el material luego que éste se descongele hasta que vuelva a su apariencia original.
- Determine las dosis adecuadas mediante la ejecución de ensayos previos.

#### ALMACENAMIENTO

PLASTOL HR - DF debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado y en áreas ventiladas.

Vida útil de almacenamiento: 6 meses a granel y 1 año en tambor.

#### PRESENTACION

Tambor            220 kg  
Granel

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web [www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co) para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala.

EUCLID - TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

Octubre 21 de 2009

## Anexo 7: Aditivo Plastol HR-DM

Referencia: (TOXEMENT, 2013)



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co  
www.toxement.com.co

### PLASTOL HR - DM

Aditivo reductor de agua de alto rango con moderado retardo para concreto

TX40T \_\_\_\_

#### HOJA TECNICA PRELIMINAR

##### DESCRIPCION

**PLASTOL HR - DM** es un aditivo reductor de agua de alto rango, con moderado retardo, diseñado para producir concreto de alto desempeño con mayor tiempo de manejabilidad.

**PLASTOL HR - DM** no contiene cloruros ni otros componentes que incrementen el potencial de corrosión en el concreto.

**PLASTOL HR - DM** es un aditivo de alto desempeño para construcciones de grandes estructuras de concreto.

**PLASTOL HR - DM** cumple con las normas:  
ASTM C-494 aditivos químicos para concreto tipo D y G.  
ASTM C-1017 Especificaciones de aditivos químicos usados en la fabricación de concreto fluido.

##### INFORMACION TECNICA

Apariencia : Líquido de color café  
Densidad : 1.054 kg/l +/- 0.03 kg/l

##### USOS

**PLASTOL HR - DM** se utiliza principalmente en:

- Concreto con relación agua : cemento bajo.
- Concretos con agregados que generan mezclas ásperas y poco cohesivas.
- Concretos para estructuras hidráulicas, enterradas o en contacto permanente con agua.
- Concretos bombeables.
- Para lograr plasticidad en concretos para lanzado vía húmeda.
- En procesos constructivos como formaleas deslizantes en donde se requiere alta manejabilidad y excelentes acabados.
- En general para todos los propósitos de un concreto premezclado.
- Concreto de alto desempeño.

##### VENTAJAS

- **PLASTOL HR - DM** provee una excelente manejabilidad.

- Permite el uso de un solo aditivo cuando se requiere reducción de agua, alta manejabilidad e inclusión de aire entre 3,5% y 6%.
- Genera reducciones de agua típicas para aditivos de alto rango: 5% a 25%.
- Provee una excelente manejabilidad.
- Reduce la permeabilidad del concreto.
- Ideal cuando se emplean arena de módulo de finura altos.
- Se puede trabajar como reductor de agua de alto poder, como aditivo de rango medio y como plastificante tipo G.
- Otorga a las mezclas excelentes resistencias mecánicas.

##### DOSIFICACION

**PLASTOL HR - DM** puede ser usado del 0,2% al 1,2% del peso del cemento dependiendo del efecto deseado para el concreto.

Se recomienda hacer pruebas en obra para determinar la dosis óptima del aditivo.

##### APLICACION

**PLASTOL HR - DM** puede ser adicionado en la planta después que la mezcla de concreto ha sido humedecida o en la última porción del agua de amasado.

**PLASTOL HR - DM** puede ser adicionado en el sitio de trabajo para incrementar el asentamiento.

Debido a su química el **PLASTOL HR - DM**, genera retención de la trabajabilidad y acabados excelentes; características ideales en trabajos donde se requiere un terminado liso y donde se emplean agregados triturados.

No emplee **PLASTOL HR - DM** en combinación con aditivos base Naftaleno tales como el EUCON 37, EUCON 1037, EUCON MR 380, EUCON MR 370. Para mayor información consulte con el Departamento Técnico de EUCUD - TOXEMENT.

##### RECOMENDACIONES ESPECIALES

- No use **PLASTOL HR - DM** con aditivos base Naftaleno.
- Por sus características **PLASTOL HR - DM** puede generar retardos de fraguado en dosis superiores al 0,5% cuando se emplee en climas fríos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: [atencioncliente@toxement.com.co](mailto:atencioncliente@toxement.com.co)  
[www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co)

- Para el uso de dosis mayores consulte con el Departamento Técnico de EUCLID - TOXEMENT.
- Evite que el material se congele, en el caso de congelamiento agite muy bien el material luego que éste se descongele hasta que vuelva a su apariencia original.
- Determine las dosis adecuadas mediante la ejecución de ensayos previos.

#### ALMACENAMIENTO

**PLASTOL HR - DM** debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado y en áreas ventiladas.

Vida útil de almacenamiento: 6 meses a granel y 1 año en tambor.

#### PRESENTACION

Tambor            220 kg  
Granel

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web [www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co) para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala.

EUCLID - TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

Agosto 15 de 2013

## Anexo 8: Imágenes de fallas a compresión



Imagen 11: Falla cilindro 1



Imagen 12: Falla cilindro 2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA





Imagen 13: Falla cilindro 3



Imagen 14: Falla cilindro 4

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA



Imagen 15: Falla cilindro 5



Imagen 16: Falla cilindro 6

En la Imagen 11, Imagen 12, Imagen 13, Imagen 14, Imagen 15 y la Imagen 16 se pueden apreciar una serie de fallas que se obtuvieron durante los ensayos a compresión.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA